

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC

ENGENHARIA DE INSTRUMENTAÇÃO, AUTOMAÇÃO E ROBÓTICA

TIAGO LOPES SANTOS

**PROJETO E CARACTERIZAÇÃO DE UMA LISN (*LINE
IMPEDANCE STABILIZATION NETWORK*) PARA
COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA**

SANTO ANDRÉ - SP

2023

TIAGO LOPES SANTOS

**PROJETO E CARACTERIZAÇÃO DE UMA LISN (*LINE
IMPEDANCE STABILIZATION NETWORK*) PARA
COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA**

Trabalho de Graduação apresentado como
requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Instrumentação,
Automação e Robótica pela Universidade
Federal do ABC

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Bender Perotoni

SANTO ANDRÉ - SP

2023

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do ABC

Elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da UFABC
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Santos, Tiago Lopes

PROJETO E CARACTERIZAÇÃO DE UMA LISN (LINE IMPEDANCE
STABILIZATION NETWORK) PARA COMPATIBILIDADE
ELETROMAGNÉTICA / Tiago Lopes Santos. — 2023.

81 fls. : il.

Orientador: Marcelo Bender Perotoni

Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal do ABC,
Bacharelado em Engenharia de Instrumentação, Automação e Robótica, Santo
André, 2023.

1. LISN. 2. Compatibilidade eletromagnética. 3. Emissão conduzida. 4.
Metrologia. 5. Engenharia elétrica. I. Perotoni, Marcelo Bender. II.
Bacharelado em Engenharia de Instrumentação, Automação e Robótica, 2023.
III. Título.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, meu filho, meus pais e ao meu irmão pelo apoio, compreensão e motivação. Sem vocês não seria possível.

Ao Professor Marcelo Bender Perotoni pela sua boa vontade, incentivos, valorosas sugestões. O melhor orientador que eu poderia ter tido.

À Professora Kátia Franklin Albertin Torres por além de ter sido uma querida professora na minha trajetória acadêmica, ter aceito fazer a avaliação deste trabalho.

Ao Laboratório de Metrologia Elétrica do IPT, a minha segunda casa, pelo suporte de infraestrutura laboratorial para execução dos testes e caracterizações.

Ao pesquisador Fabrício Gonçalves Torres por ser o grande incentivador de que este trabalho abordasse o tema de LISN.

Ao pesquisador Marcelo Sanches Dias, agradeço por todas as dicas. Nossas conversas informais foram tão valiosas quanto qualquer referência bibliográfica na execução deste trabalho.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram não só para a execução deste trabalho, mas para a formação deste futuro engenheiro.

RESUMO

Este documento descreve as etapas de implementação, caracterização e utilização de uma LISN. Os principais objetivos deste trabalho incluem a implementação de uma LISN em conformidade com a norma CIRPR 16-1-2, a medição de suas características essenciais e a realização de ensaios de emissão conduzida em diferentes cargas. Uma revisão bibliográfica sobre compatibilidade eletromagnética, o papel da LISN nesse contexto e suas características foi realizada. Os critérios e procedimentos de montagem do circuito foram detalhados. Após a implementação da LISN, seus principais atributos foram caracterizados. Os ensaios de emissão conduzida demonstraram que o sistema de medição foi sensível o suficiente para avaliar as emissões conduzidas de diferentes cargas sob condições de teste semelhantes. Além disso, enfatizou-se a relação custo/benefício da LISN em comparação com dispositivos comerciais.

Palavras chave: LISN; EMC; compatibilidade eletromagnética; EMI; interferência eletromagnética; metrologia.

ABSTRACT

This document describes the stages of implementation, characterization, and utilization of a LISN. The main objectives of this work include implementing a LISN in compliance with the CIRPR 16-1-2 standard, measuring its essential characteristics, and performing emission tests on various loads. A literature review on electromagnetic compatibility, the role of the LISN in this context, and its characteristics was conducted. The assembly criteria and circuit assembly procedures were detailed. Following the implementation of the LISN, its main attributes were characterized. Emission tests demonstrated that the measurement system was sensitive enough to assess the conducted emissions from different loads under similar test conditions. Furthermore, the cost-effectiveness of the LISN implementation was emphasized in comparison to commercial devices.

Keywords: LISN; EMC; electromagnetic compatibility; EMI; electromagnetic interference; metrology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Configuração de medição de ruído conduzido: a) sem utilizar uma LISN; b) utilizando-se uma LISN	13
Figura 2 – Modelo elétrico de uma LISN "50 Ω // (50 μ H + 5 Ω)"	14
Figura 3 - Acidente automobilístico causado por falha de sistema de freios, devido a interferências eletromagnéticas.....	16
Figura 4 – Diagrama de controle de EMC	17
Figura 5 - Os 4 problemas de EMC: a) Emissão radiada; b) Susceptibilidade radiada; c) Emissão conduzida; d) Susceptibilidade conduzida	19
Figura 6 - Emissão e susceptibilidade eletromagnética	19
Figura 7 - a) Radiação entre sistemas; b) Radiação entre subsistemas de um sistema.....	20
Figura 8 - Espaço de Testes em Campo Aberto (OATS)	21
Figura 9 - Câmara Anecoica Blindada	22
Figura 10 - Interferência por condução	23
Figura 11 - Correntes de modo comum e diferencial: (a) entre dois sistemas; (b) em trilhas de uma PCB	24
Figura 12 - Circuito básico da LISN "50 Ω // (50 μ H + 5 Ω)" conforme CISPR 16-1-2	26
Figura 13 - Comportamento da impedância na frequência de ressonância	28
Figura 14 - Indutor de 50 μ H com núcleo de ar	29
Figura 15 - Indutores comerciais a serem testados.....	30
Figura 16 - Atenuador de 10 dB	32
Figura 17 - Esquemático final da LISN.....	32
Figura 18 - Bloco funcional da LISN.....	33
Figura 19 - Esquema de ligação para medição de impedância da LISN	34
Figura 20 - Gráfico de impedância da LISN	34
Figura 21 - Esquema de ligação para medição de perda de inserção. (a) medição do sinal de entrada - normalização; (b) medição do sinal de saída - atenuação.....	37
Figura 22 - Esquema de ligação para medição de isolamento da entrada (a) medição do sinal de entrada normalização; (b) medição do sinal de saída - atenuação.....	39
Figura 23 - Cargas para teste de emissão conduzida: (a) multímetro de bancada; (b) carregador de notebook original; (c) carregador de celular não homologado	40

Figura 24 - Diagrama de ligação para o ensaio de emissão conduzida	41
Figura 25 - (a) indutor toroidal durante as medições; (b) curva de impedância e fase do indutor	43
Figura 26 - Medições do (a) R121 e (b) C211 utilizando o medidor RLC	44
Figura 27 - Atenuação medida no atenuador de 10 dB	45
Figura 28 - Curvas de VSWR do Atenuador de 10 dB. (a) curva na porta (m); (b) curva na porta (f)	46
Figura 29 – (a) montagem do circuito da LISN na PCI; (b) LISN acoplada na caixa plástica	47
Figura 30 - Gráfico da medição de impedância - L1	49
Figura 31 - Gráfico da medição de impedância - N	51
Figura 32 - Gráfico da medição de perda de inserção - L1	53
Figura 33 - Gráfico da medição de perda de inserção - N	55
Figura 34 - Gráfico da medição de isolamento - L1	57
Figura 35 - Gráfico da medição de isolamento - N	59
Figura 36 - Diagrama elétrico do primeiro circuito simulado em LTspice	60
Figura 37 - Resultado da simulação em LTspice do primeiro circuito	60
Figura 38 - Diagrama elétrico do segundo circuito simulado em LTspice	61
Figura 39 - Resultado da simulação em LTspice do segundo circuito	61
Figura 40 - Gráfico da emissão conduzida do multímetro de bancada - L1	64
Figura 41 - Gráfico da emissão conduzida do multímetro de bancada - N	66
Figura 42 - Gráfico da emissão conduzida do carregador de notebook - L1	68
Figura 43 - Gráfico da emissão conduzida do carregador de notebook - N	70
Figura 44 - Gráfico da emissão conduzida do carregador de celular - L1	72
Figura 45 - Gráfico da emissão conduzida do carregador de celular - N	74
Figura 46 - Especificações fixadas no corpo da LISN	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites de tensão de perturbação conduzidas	24
Tabela 2 - Pontos de medição de impedância.....	35
Tabela 3 - Resultados nos testes dos indutores	42
Tabela 4 - Resultados dos testes dos componentes da LISN em 1 kHz	44
Tabela 5 - Caracterização de impedância - L1	48
Tabela 6 - Caracterização de impedância - N.....	50
Tabela 7 - Caracterização de perda de inserção - L1	52
Tabela 8 - Caracterização de perda de inserção - N	54
Tabela 9 - Caracterização de isolamento - L1	56
Tabela 10 - Caracterização de isolamento - N.....	58
Tabela 11 - Ensaio de emissão conduzida do multímetro de bancada - L1.....	63
Tabela 12 - Ensaio de emissão conduzida do multímetro de bancada - N.....	65
Tabela 13 - Ensaio de emissão conduzida do carregador de notebook - L1	67
Tabela 14 - Ensaio de emissão conduzida do carregador de notebook - N	69
Tabela 15 - Ensaio de emissão conduzida do carregador de celular - L1	71
Tabela 16 - Ensaio de emissão conduzida do carregador de celular - N.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS - sistema de freios antitravamentos (*anti-lock braking system*)

AC – corrente alternada (*alternate current*)

AMN – rede de alimentação artificial (*artificial mains network*)

CDN - rede de acoplamento e desacoplamento (*coupling and decoupling network*)

CISPR – Comitê Internacional Especial de Perturbações Radioelétricas (*Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques*)

CSA – câmara semi-anecoica

DUT - dispositivo sob teste (*device under test*)

EMC - compatibilidade eletromagnética (*electromagnetic compatibility*)

EMI - interferência eletromagnética (*electromagnetic interference*)

IEC – Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission*)

IEV – Vocabulário Eletrotécnico Internacional (*International Electrotechnical Vocabulary*)

LISN - rede de estabilização de impedância de linha (*line impedance stabilization network*)

OATS - espaço de testes em área aberta (*open area test site*)

PCI - placa de circuito impresso

RF – radiofrequência

VNA – analisador de rede vetorial (*vector network analyzer*)

VSWR – relação de ondas estacionárias de tensão (*voltage standing wave ratio*)

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	12
1.1 – Compatibilidade eletromagnética - EMC	15
1.2 – Interferência eletromagnética - EMI	17
1.3 – Interferência radiada	20
1.4 – Interferência conduzida	22
1.5 – Correntes de Modo Comum e Modo Diferencial	24
2 - OBJETIVOS	25
2.1 – Objetivos Gerais.....	25
2.2 – Objetivos Específicos	25
3 - Metodologia.....	26
3.1 – Implementação do circuito.....	26
3.1.1 – Norma CISPR 16-1-2	26
3.1.2 – LISN “50 Ω // (50 μ H + 5 Ω)”	26
3.1.3 – Indutor de 50 μ H.....	27
3.1.4 – Demais elementos do circuito	31
3.2 – Caracterização da LISN	33
3.2.1 – Impedância característica da LISN.....	33
3.2.2 – Perda de inserção total da LISN.....	36
3.2.3 – Isolação entre o sinal de entrada e o circuito de medição.....	37
3.3 – Ensaio de emissão conduzida.....	39
4 – Resultados e Discussão	42
4.1 – Teste dos componentes.....	42
4.1.1 – Indutor de 50 μ H.....	42
4.1.2 – Resistores, indutores e capacitores – 1 kHz	43
4.1.3 – Atenuador de 10 dB	45
4.2 – Montagem do circuito	46
4.3 – Caracterização da LISN	47
4.3.1 – Impedância característica da LISN.....	47
4.3.2 – Perda de inserção total da LISN.....	51
4.3.3 - Isolação entre o sinal de entrada e o circuito de medição.....	55
4.4 – Ensaio de emissão conduzida.....	62
4.4.1 – Carga 1: multímetro de bancada	62

4.4.2 – Carga 2: carregador de notebook.....	66
4.4.3 – Carga 3: carregador de celular.....	71
4.4.4 – YouTube: demonstração dos ensaios realizados	75
4.5 – Estimativa de custos.....	75
4.6 – Especificações da LISN desenvolvida.....	77
5 – Conclusões e perspectivas.....	78
REFERÊNCIAS.....	80

1 – INTRODUÇÃO

Uma rede de estabilização de impedância de linha (*line impedance stabilization network* - LISN), também conhecida como rede de alimentação artificial (*artificial mains network* - AMN), é um dispositivo projetado para realizar a medição, em conjunto com um medidor de RF, da emissão de tensão conduzida pelos terminais de entrada de uma carga, ou dispositivo sob teste (*device under test* - DUT). (IEC CISPR 16-1-1, 2019). A mesma pode ser entendida como um filtro passa-baixa, com impedância conhecida.

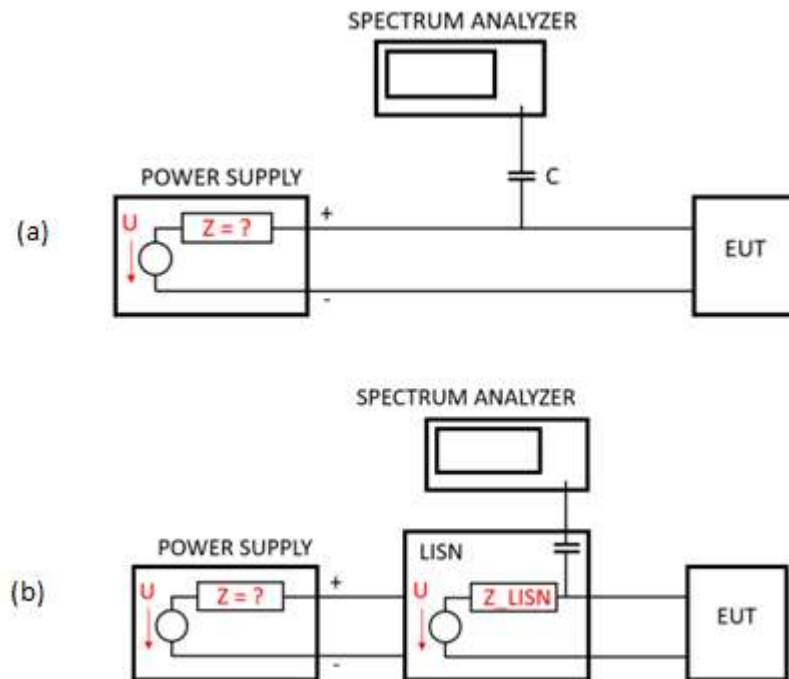
As LISNs são inseridas nas linhas de alimentação do DUT e fornecem uma saída de RF para medir emissões conduzidas. Em outras configurações de teste, as LISNs são inseridas nas linhas de alimentação do DUT apenas com o objetivo de criar uma impedância de fonte definida. (MAYERHOFER, 2022)

Geralmente a impedância de saída da rede elétrica, ou de uma fonte de alimentação são desconhecidas e variam de umas para as outras, inclusive dependendo a carga na qual estão conectadas. Para se realizar testes de compatibilidade eletromagnética (*electromagnetic compatibility* - EMC), se requer uma configuração robusta e repetível, que é criada quando é inserida uma LISN em série com a fonte. Dessa maneira, o DUT não “enxerga” mais a impedância de saída da fonte, mas sim a impedância estável especificada da LISN. (MAYERHOFER, 2022)

Para a realização da medição de ruído conduzido de maneira simples, a configuração apresentada no diagrama em blocos da figura 1 (a) pode ser utilizada.

Nesse caso, a amplitude do sinal das emissões conduzidas medida será influenciada pela impedância da fonte, pois é criado um divisor de tensão no sistema que influencia a quantidade de sinal percebida pelo medidor de RF. Porém se esse teste, ou ensaio fosse realizado em outro laboratório, com outra fonte de alimentação, mas sobre o mesmo DUT, os resultados poderiam ser diferentes, já que a impedância de saída da fonte deste segundo arranjo poderia ser diferente daquela do arranjo inicial. Ou seja, para se obter resultados compatíveis para o mesmo DUT em qualquer laboratório é necessário que haja uniformidade nas impedâncias de saída das fontes de alimentação e este requisito é satisfeito ao se inserir uma LISN no arranjo, conforme mostrado na Figura 1 (b). (MAYERHOFER, 2022)

Figura 1- Configuração de medição de ruído conduzido: a) sem utilizar uma LISN; b) utilizando-se uma LISN



Fonte: MAYERHOFER, 2022

Uma LISN idealmente pode ser conectada a qualquer fonte de alimentação e fornecer a mesma capacidade de tensão e corrente aos terminais do DUT.

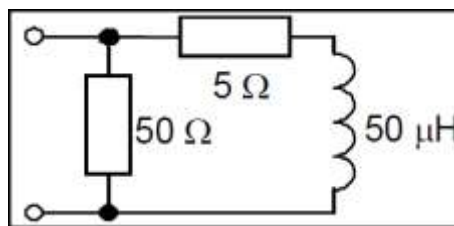
No entanto, a sua impedância de saída é especificada pelos padrões de EMC e permite reprodutibilidade da medição de emissão conduzida em qualquer laboratório. (MAYERHOFER, 2022)

Isto posto, temos que uma LISN se caracteriza por 3 propósitos:

- definir a impedância da linha de alimentação da carga. Caso contrário, para medições realizadas em uma mesma carga com diferentes fontes de alimentação pode-se produzir resultados inconsistentes e não repetíveis;
- acoplar o sinal de interferência eletromagnética presente nos terminais de alimentação da carga ao instrumento de medição (geralmente um analisador de espectro, ou um “*EMI receiver*”), de forma a evitar que a tensão da rede (em baixa frequência) seja aplicada diretamente ao instrumento de medição e
- filtrar o ruído de linha presente na rede de alimentação, de maneira que seja medido apenas o ruído gerado pela carga. (ORFORD e WILLIAMS, 1999)

A norma CISPR 16-1-2 especifica diversas variantes de LISN, mas a versão " $50\ \Omega \parallel (50\ \mu\text{H} + 5\ \Omega)$ ", cujo modelo elétrico é apresentado na Figura 2, tornou-se a mais comum e está amplamente disponível em fornecedores comerciais. Este modelo será abordado e reproduzido nesse trabalho. Além disso, outros modelos de LISN são especificadas para testes militares, aeroespaciais ou automotivos, bem como para sinal ou portas de controle. A escolha do dispositivo adequado depende da aplicação específica e dos requisitos de conformidade eletromagnética do dispositivo eletrônico em teste. (IEC CISPR 16-1-2, 2014; ORFORD e WILLIAMS, 1999)

Figura 2 – Modelo elétrico de uma LISN " $50\ \Omega \parallel (50\ \mu\text{H} + 5\ \Omega)$ "



Fonte: IEC CISPR 16-1-2, 2014

Existem basicamente dois tipos de redes de AMN (ou LISN):

- V-AMN: projetada para acoplar tensões de perturbação assimétricas, ou seja, aquelas que não são simétricas em relação ao terra, às linhas de alimentação do DUT;
- Δ -AMN: por outro lado, é projetada para acoplar tensões de perturbação simétricas e assimétricas separadamente às linhas de alimentação do DUT.

Ambos são importantes para garantir que os dispositivos atendam aos padrões de EMC e não causem interferência prejudicial em outros equipamentos. A escolha de cada tipo vai depender do ensaio a ser realizado. (IEC CISPR 16-1-2) Conforme especificação da norma 16-1-2, a LISN do tipo " $50\ \Omega \parallel (50\ \mu\text{H} + 5\ \Omega)$ " é do tipo V-AMN.

Nos subcapítulos de 1.1 a 1.5 serão abordados tópicos gerais da área de EMC e suas subdivisões, além de conceitos de Interferência Eletromagnética, suas diferenças e ensaios realizados.

1.1 – Compatibilidade eletromagnética - EMC

A compatibilidade eletromagnética é uma área da engenharia elétrica que surgiu devido à constatação de que muitos equipamentos eletrônicos podem interferir uns nos outros e/ou sofrer interferência do ambiente. (LIZ, 1999)

Historicamente, os equipamentos eletrônicos foram projetados para atender a uma necessidade funcional sem se preocupar com a interferência eletromagnética (*electromagnetic interference* - EMI) que poderiam causar ou sofrer. No entanto, verificou-se que alguns equipamentos não funcionavam corretamente em diferentes ambientes. Há vários exemplos de interferências eletromagnéticas, como um eletrodoméstico causando linhas de interferência em uma tela de TV de tubo de raios catódicos, um bisturi elétrico interferindo em outros equipamentos em uma sala de cirurgia ou marca-passos que podem falhar quando expostos a interferências eletromagnéticas (exemplo de portas de banco com detector de metais ou sistemas de raio-X para controle de acesso, presentes em aeroportos). Desta forma, houve a necessidade de estudar, avaliar e estabelecer limites aceitáveis para essas interferências, resultando no surgimento da compatibilidade eletromagnética. (LIZ, 1999)

A figura 3 mostra um acidente de automóvel provocado por mau funcionamento do sistema de freios. Interferências eletromagnéticas impediram que o sistema de freios antitravamentos (ABS – *anti-lock braking system*) do veículo atuasse para parar o veículo em uma passagem de nível. (STRUZAK, 2005) O veículo em questão colidiu com um bonde e um poste. A motorista por sorte sobreviveu ao acidente. (WRECKED..., 2008)

Figura 3 - Acidente automobilístico causado por falha de sistema de freios, devido a interferências eletromagnéticas



Fonte: WRECKED..., 2008

Devido ao aumento da produção de dispositivos eletrônicos ao longo dos anos, a EMC tornou-se um tema de grande importância. Por esse motivo, organizações nacionais e internacionais trabalham juntas na harmonização de procedimentos e práticas relacionadas ao assunto, sendo a Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission* - IEC) e o Comitê Internacional Especial de Perturbações Radioelétricas (*Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques* - CISPR) duas das principais referências. É obrigatório que qualquer produto eletroeletrônico destinado à venda em qualquer país esteja normalizado e em conformidade com as diretrizes nacionais de compatibilidade eletromagnética. (IEC CISPR 11, 2015)

A EMC está relacionada ao fato de um sistema ser eletromagneticamente compatível ou não. Ele deve operar de acordo com suas características funcionais, em um ambiente eletromagnético próprio, sem impor aos sistemas adjacentes que compartilham o ambiente, perturbações de natureza eletromagnética que extrapolem os limites estabelecidos. (IWASHITA, 2015)

Assim, diz-se que um equipamento ou sistema é eletromagneticamente compatível somente quando atende aos seguintes critérios:

- não causa EMI em outros sistemas ou equipamentos;

- não é susceptível a EMI gerada por outros sistemas ou equipamentos e
- não causa EMI nele próprio. (PAUL, 2006)

Estes critérios têm como objetivo não só assegurar que um produto apresente um desempenho funcional satisfatório, mas também que esteja em conformidade com normas e regulamentos legais antes de ser disponibilizado no mercado. (PAUL, 2006)

A partir da concepção de EMC, percebe-se que para a sua existência são necessários um sistema de geração de interferência (fonte), um meio de propagação para essa interferência (caminho de acoplamento) e um sistema susceptível, no qual a interferência incidirá (receptor). Assim, são apresentados esquematicamente na Figura 4 os elementos necessários para a ocorrência da EMI. (SCHLICHTING, 2003)

Figura 4 – Diagrama de controle de EMC



Fonte: SCHLICHTING, 2003 - Adaptado

Quanto mais se avança à direita no diagrama de controle de EMC, maior é o custo envolvido na resolução de problemas. Ou seja, é mais econômico e eficiente implementar medidas de supressão de interferência na fonte ou no caminho do sinal, em vez de investir em tecnologias avançadas de imunidade para o receptor. (PAUL, 2006)

Da mesma maneira, quanto mais avançado está um projeto mais custosa é a identificação e correção de eventuais problemas de EMC, justificando o uso de ferramentas de análise e teste em etapas mais preliminares do desenvolvimento. Essas ferramentas de análise preliminares, quando não pertencentes a um laboratório certificado de EMC, são denominadas *pre-compliance*, e esse projeto contempla uma LISN que poderia a ser usada em atividades dessa natureza.

1.2 – Interferência eletromagnética - EMI

A interferência eletromagnética é uma crescente e preocupante forma de poluição ambiental que impacta a vida diária das pessoas de várias maneiras, desde distúrbios menores, como ruídos em linhas telefônicas analógicas, até consequências

graves, como falhas ou corrupção de dados em sistemas críticos de controle, panes em aeronaves, entre outros. (Williams, 2017)

Conforme o Vocabulário Eletrotécnico Internacional (*International Electrotechnical Vocabulary* - IEV), a EMI é definida como a "degradação da performance de um equipamento, canal de transmissão ou sistema causado por uma perturbação eletromagnética". Além disso, os termos "perturbação eletromagnética" e "interferência eletromagnética" são designados, respectivamente, como causa e efeito, e não devem ser utilizados de forma indiscriminada. (IEC 60050-161, 2023)

Um sistema é caracterizado como causador de EMI quando a energia eletromagnética gerada por ele é transferida para outro sistema, levando a um desempenho inadequado. Essa transferência não intencional de energia eletromagnética (ruído) de um sistema para outro pode ocorrer por meios também não intencionais, como a radiação pelo ar ou condução por condutores metálicos. (PAUL, 2006)

Para diminuir o grau de EMI entre dois sistemas, é necessário adotar principalmente três procedimentos:

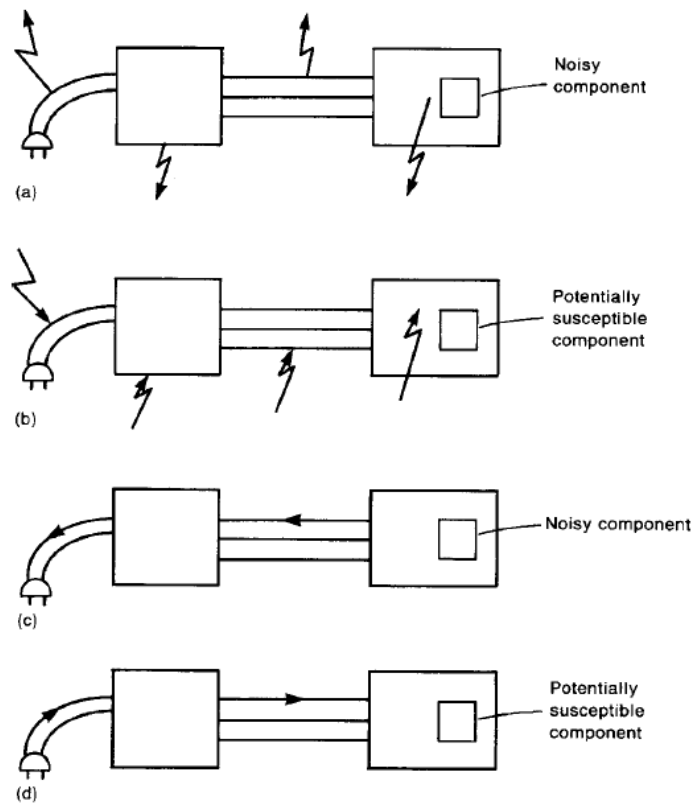
- encontrar a origem da interferência e minimizar a sua emissão o máximo possível;
- detectar e tornar o menos eficaz possível o caminho de acoplamento entre a fonte de interferência e o receptor, ou seja, dificultar ao máximo a propagação de emissões, seja por meio de radiação ou condução e
- minimizar a susceptibilidade do receptor às emissões provenientes da fonte. (PAUL, 2006)

No que se refere à prevenção da EMI, podemos categorizar a transferência não intencional de energia eletromagnética de um sistema para outro em quatro subgrupos:

- emissões conduzidas;
- emissões radiadas;
- susceptibilidade à condução e
- susceptibilidade à radiação. (PAUL, 2006; SCHLICHTING, 2003)

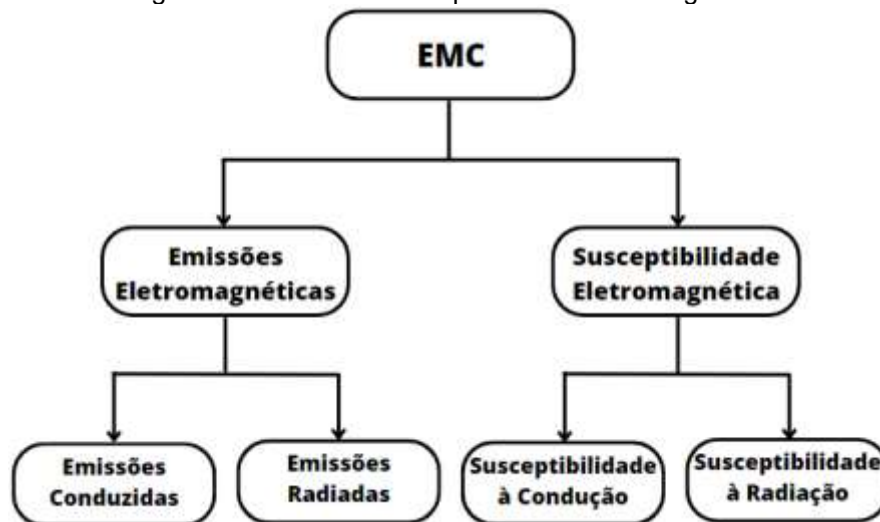
A Figura 5 e a Figura 6 esquematizam os 4 subgrupos de emissão e susceptibilidade eletromagnética.

Figura 5 - Os 4 problemas de EMC: a) Emissão radiada; b) Susceptibilidade radiada; c) Emissão conduzida; d) Susceptibilidade conduzida



Fonte: PAUL, 2006

Figura 6 - Emissão e susceptibilidade eletromagnética



Fonte: SCHLICHTING, 2003 - Adaptado

É relevante destacar que há uma interdependência entre a capacidade de gerar e a vulnerabilidade a EMI. Em outras palavras, se um DUT gera ou emite certa frequência ou faixa de frequências, ele tende a ser vulnerável a essa mesma

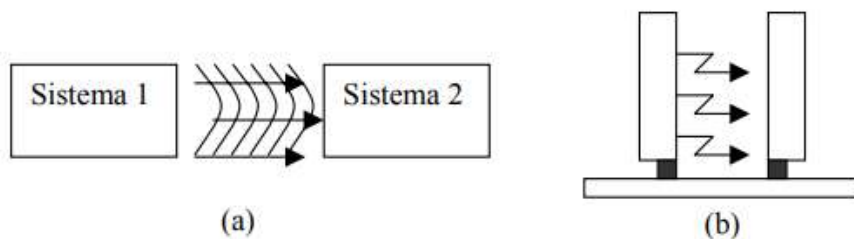
frequência ou faixa de frequências, devido ao princípio da reciprocidade de sistemas radiantes. (PAUL, 2006)

1.3 – Interferência radiada

A radiação é uma forma pela qual o ruído eletromagnético pode entrar ou sair de um sistema através de meios não metálicos, como o ar. Esse ruído é gerado por correntes que circulam em trilhas de uma placa de circuito impresso (PCI), cabos, terminais de semicondutores ou em caminhos fechados criando campos eletromagnéticos cuja intensidade é determinada pela amplitude e frequência da corrente, bem como pelo tamanho dos cabos, áreas dos caminhos fechados, entre outros fatores. (LIZ, 1999)

Prever ou reduzir as interferências radiadas é um trabalho desafiador que requer um amplo conhecimento do comportamento eletromagnético dos materiais que compõem e circundam um sistema. A figura 7 ilustra a interferência por radiação entre diferentes sistemas e subsistemas de um mesmo sistema. O estudo desses fatores permite a adoção de técnicas para minimizar interferências e garantir o bom funcionamento do sistema. (SCHLICHTING, 2003)

Figura 7 - a) Radiação entre sistemas; b) Radiação entre subsistemas de um sistema



Fonte: SCHLICHTING, 2003

Os testes de emissões radiadas compreendem a medição dos campos elétricos em locais específicos, preferencialmente em espaços de testes em áreas abertas (*open area test site* - OATS). Também são utilizadas câmaras anecóicas e câmaras semi-anecóicas (CSA) para esses ensaios. (PAUL, 2006)

A Figura 8 apresenta um exemplo desse tipo de ambiente propício para as medidas.

Figura 8 - Espaço de Testes em Campo Aberto (OATS)



Fonte: YAMASAKI, 2017

Embora preferido, o método de teste pode ser prejudicado pelo ruído de fundo em alguns locais, o que pode mascarar os resultados reais. É necessário realizar os testes em campos remotos longe de centros urbanos devido ao aumento da emissão de ondas de rádio globalmente. Além disso, as condições climáticas podem variar em campo aberto, afetando os resultados. (ALVARES, 2017)

Outra maneira de se realizar os ensaios é através de uma CSA. Essas câmaras são compostas por uma sala com blindagem hermética, projetada para impedir a entrada de campos elétricos externos que possam interferir nas medições, além de evitar reflexões dos campos emitidos pelo equipamento em teste, que possam prejudicar as medidas realizadas. Elas simulam o espaço livre obtido por um ensaio em campo aberto (ALVARES, 2017). A Figura 9 mostra a realização de um ensaio de imunidade radiada sobre um equipamento eletroeletrônico em uma câmara anecóica.

Figura 9 - Câmara Anecoica Blindada



Fonte: INPE-LIT, [2010]

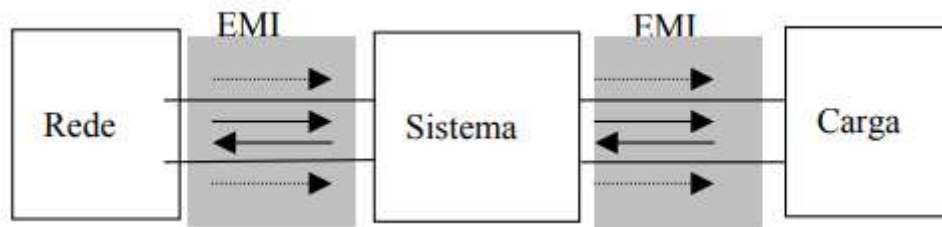
1.4 – Interferência conduzida

A condução é uma forma pela qual o ruído eletromagnético pode entrar ou sair de um sistema através de condutores metálicos ou elementos parasitas, que estejam em contato galvânico. As agências reguladoras estabelecem restrições às emissões conduzidas porque essas emissões têm a capacidade de se propagar através da rede, o que pode afetar negativamente outros sistemas conectados a ela. O sistema de distribuição de energia funciona como uma grande antena que pode irradiar ruídos conduzidos, gerando emissões irradiadas que podem provocar interferências. Em resumo, as emissões conduzidas podem gerar interferências irradiadas devido à característica do sistema de distribuição de energia como uma grande antena. (LIZ, 1999)

De maneira geral, diminuir as emissões conduzidas é considerado um processo mais fácil do que reduzir as emissões irradiadas, pois existe apenas uma via para essas emissões que precisa ser controlada: o cabo de alimentação do DUT. Entretanto, é crucial compreender que se um dispositivo não atende aos limites de emissão por condução, é improvável que atenda aos limites de irradiação. Dessa forma, a atenção maior deve ser dada ao controle das emissões conduzidas como

uma prioridade (LIZ, 1999). A figura 10 mostra um esquema de como ocorre a interferência por condução.

Figura 10 - Interferência por condução



Fonte: SCHLICHTING, 2003

Os fabricantes de equipamentos eletroeletrônicos devem considerar a susceptibilidade à condução durante a etapa de projeto, além da conformidade com as normas de emissões por condução e irradiação. Os equipamentos precisam ser insensíveis a distúrbios na rede elétrica, como relâmpagos, para garantir operação confiável. As normas de emissão por condução controlam o potencial de interferência das emissões irradiadas, mas os distúrbios de grande magnitude podem causar interferência direta através do cabo de alimentação. Esse tipo de interferência representa um problema de susceptibilidade à condução que deve ser levado em conta pelos fabricantes. Soluções para este problema incluem a utilização de filtros de linha de modos comum e diferencial na entrada, redução dos acoplamentos parasitas com dissipadores de calor e um cuidadoso projeto da disposição dos componentes e trilhas na PCI. (PAUL, 2006)

Para efetuar os testes de emissão conduzida, são efetuadas medições na entrada de energia do DUT. É imprescindível empregar o LISN para assegurar uma impedância determinada em frequências elevadas por meio de um ponto de medição, conforme ilustrado no diagrama de blocos da figura 1 (b), para conectar o ponto de medição ao medidor de RF e para proteger o circuito de testes de interferências indesejáveis advindas da rede elétrica. (Williams, 2017)

O dispositivo de medição (analisador de espectro) é responsável por varrer a faixa de frequência que se estende de 0,15 MHz a 30 MHz. Em cada frequência amostrada dentro dessa faixa, ele realiza medições do sinal emitido pelo DUT, utilizando uma largura de banda (RBW) mínima de 9 kHz, e empregando detectores de “*quasi-peak*” e “*average*”. (IEC CISPR 11, 2015; Trintinalia, 2021)

Os limites estabelecidos pela norma CISPR 11, para emissões conduzidas por equipamentos digitais para uso em ambiente comercial ou industrial (“classe A”) são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Limites de tensão de perturbação conduzidas

Faixa de frequências (MHz)	Tensão “ <i>quasi-peak</i> ” - log (dB μ V)	Tensão “ <i>average</i> ” – log (dB μ V)
0,15 a 0,5	79	66
0,5 a 30	73	60

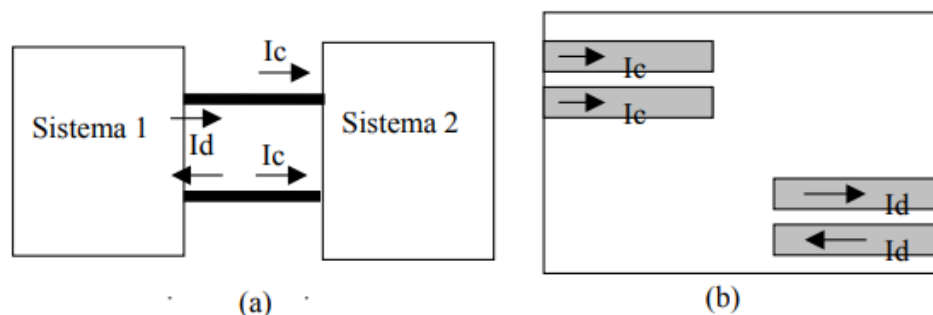
Fonte: IEC CISPR 11, 2015 - Adaptado

Utilizando-se a LISN desenvolvida e caracterizada neste trabalho, serão realizados testes simulados de EMC em 3 cargas distintas. Os limites da Tabela 1 serão utilizados como limite de conformidade dos testes realizados.

1.5 – Correntes de Modo Comum e Modo Diferencial

Em essência, os circuitos eletroeletrônicos apresentam um fio condutor para alimentação (fase, positivo), outro fio para retorno (neutro, negativo, 0 V) e um fio terra para equalização do potencial. Tanto as interferências conduzidas quanto as radiadas podem originar-se de correntes que circulam dentro de um sistema ou entre dois sistemas. Tais correntes podem ser divididas em correntes de modo comum e correntes de modo diferencial, dependendo do modo de propagação. As correntes de modo diferencial fluem em direções opostas em cabos e trilhas, enquanto as correntes de modo comum se propagam na mesma direção. A Figura 11 ilustra as componentes de modo comum (I_c) e diferencial (I_d) que se propagam entre dois sistemas e dentro das trilhas de uma PCI. (SCHLICHTING, 2003)

Figura 11 - Correntes de modo comum e diferencial: (a) entre dois sistemas; (b) em trilhas de uma PCB



Fonte: SCHLICHTING, 2003

2 - OBJETIVOS

2.1 – Objetivos Gerais

No contexto apresentado, este trabalho tem como objetivo a implementação de uma LISN, conforme a CISPR 16-1-2-anexo A, assim como a sua caracterização e ensaio contra 3 cargas distintas.

2.2 – Objetivos Específicos

Os objetivos específicos dizem respeito aos seguintes requisitos:

- apresentar os principais conceitos relacionados a EMC, EMI e os principais ensaios relacionados à área;
- descrever a função e utilização de uma LISN no contexto de EMC;
- implementar o circuito de uma LISN, observando suas características e pontos críticos;
- realizar a caracterização de impedância, perda de inserção e isolamento da LISN implementada;
- efetuar o ensaio simulado de emissão conduzida de 3 cargas com perfis construtivos e aplicações distintas, utilizando-se a LISN implementada.

3 - Metodologia

3.1 – Implementação do circuito

3.1.1 – Norma CISPR 16-1-2

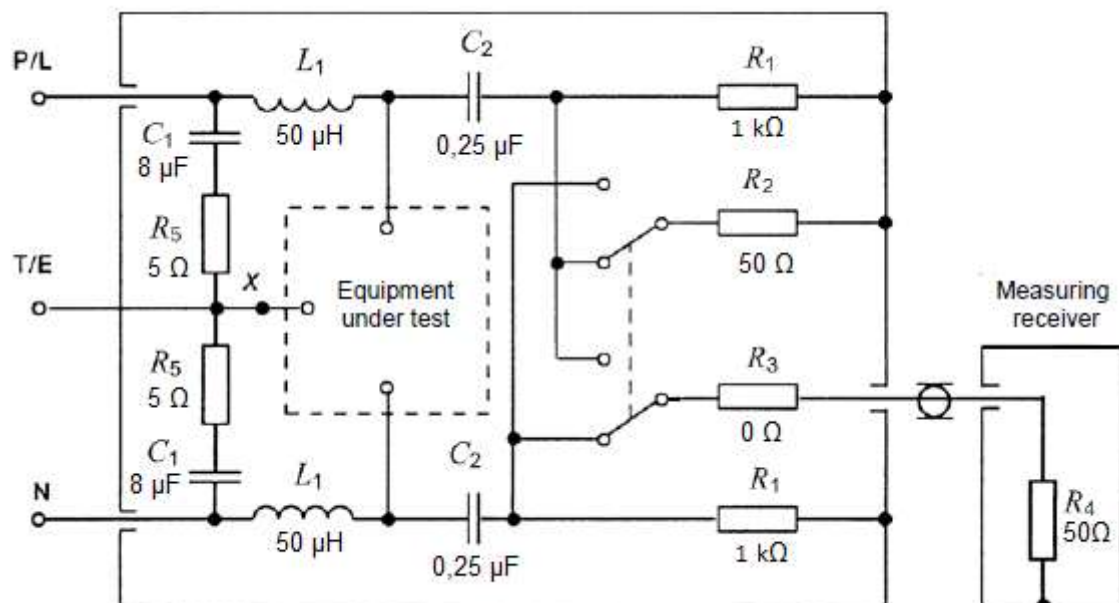
A família de normas CISPR 16 trata das especificações para dispositivos e métodos de medição de perturbações e imunidade eletromagnética. Sua parte 1-2, ou CISPR 16-1-2 aborda as características dos dispositivos de acoplamento para medições de perturbações conduzidas, como AMNs (LISNs), Redes de acoplamento e desacoplamento (CDN - *coupling and decoupling network*), unidades de acoplamento para injeção de corrente em cabos e sondas de tensão e corrente. (IEC CISPR 16-1-2, 2014)

A norma CISPR 16-1-2 será utilizada como referência para o circuito a ser implementado.

3.1.2 – LISN “ $50\ \Omega // (50\ \mu\text{H} + 5\ \Omega)$ ”

O circuito da Figura 12 é apresentado pela norma CISPR 16-1-2 como exemplo de montagem para a LISN “ $50\ \Omega // (50\ \mu\text{H} + 5\ \Omega)$ ”.

Figura 12 - Circuito básico da LISN “ $50\ \Omega // (50\ \mu\text{H} + 5\ \Omega)$ ” conforme CISPR 16-1-2



Fonte: IEC CISPR 16-1-2, 2014 - Adaptado

Diferentemente do modelo mostrado na figura 2, este circuito já inclui a replicação do circuito fundamental da LISN, permitindo a medição da emissão conduzida nos condutores de fase e neutro. Adicionalmente, incorpora acoplamentos capacitivos que efetuam a separação apropriada dos sinais de alta e baixa frequência, juntamente com um circuito de chaveamento para selecionar o sinal a ser medido (ruído na fase ou neutro).

3.1.3 – Indutor de 50 μ H

Em uma LISN, o indutor de 50 μ H é um componente importante para a supressão de interferências eletromagnéticas indesejadas durante a medição de emissões conduzidas. Ele desempenha um papel importante na filtragem de alta frequência, atenuando ruídos e transientes que possam estar presentes na linha de alimentação. Além disso, o seu comportamento em alta frequência influencia diretamente na impedância da LISN e a sua escolha deve ser criteriosa para que a confiabilidade das medições não seja comprometida.

A norma CISPR 16-1-2 dá o exemplo de construção de um indutor de 50 μ H com núcleo de ar, que suporta corrente de até 100 A e que atende às especificações de desempenho para o funcionamento de uma LISN. O modelo não será o adotado, pois as suas dimensões (cerca de 15 cm de diâmetro e 30 cm de comprimento para cada um dos indutores) e custo de implementação vão em desconcontro de uma proposta de implementação de um dispositivo compacto e de baixo custo.

Um dos limitadores de implementação do projeto passa a ser então a corrente máxima na carga a ser testada, que terá relação direta com a corrente máxima suportada pelo indutor.

Antes da escolha do indutor utilizado no circuito, foram testados 6 arranjos, entre indutores comerciais de baixo custo e um indutor com núcleo de ar ‘desenvolvido pelo autor. Os testes consistiram no levantamento do comportamento do componente na faixa de utilização da LISN (9 kHz a 30 MHz). Foram levantados os dados de:

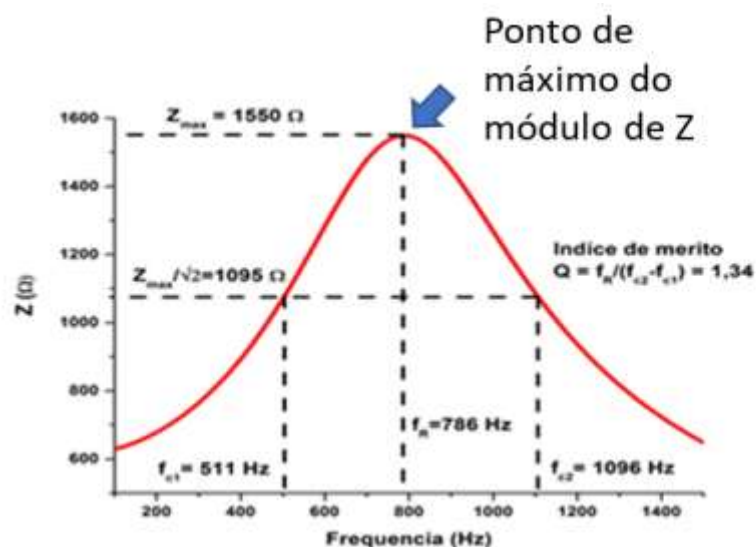
- indutância na frequência mínima de operação (9 kHz);
- frequência de ressonância;
- impedância na frequência de ressonância
- número de picos de ressonância na faixa de operação e

- impedância na frequência máxima de operação (30 MHz).

A sua indutância em baixa frequência (9 kHz) é prevista pela norma CISPR 16-1-2 como sendo $50 \mu\text{H} \pm 10 \%$.

Já para a ressonância, temos que o valor ideal seria acima da frequência máxima de operação da LISN, mas isso não é comum em indutores de baixo custo. De qualquer maneira, na ocorrência da ressonância, o indutor atinge o seu valor máximo de impedância, conforme ilustrado pela figura 13. Após a ressonância, o indutor passa a apresentar comportamento capacitivo e a sua impedância passa a diminuir com o aumento da frequência. Caso o indutor apresente apenas uma ressonância dentro da faixa de operação da LISN e a sua impedância seja suficientemente alta para não comprometer os resultados de impedância em alta frequência da LISN, este indutor pode ser utilizado na implementação do dispositivo. Caso apresente mais de uma ressonância, passa a ter comportamento instável e não deve ser utilizado nesta aplicação.

Figura 13 - Comportamento da impedância na frequência de ressonância



Fonte: SALCEDO e LOBO - 2018

Os testes foram realizados utilizando-se um Analisador de rede vetorial (*Vector Network Analyzer* - VNA) calibrado, marca HP, modelo 4195A.

Além disso, foi realizada uma análise da corrente máxima nominal suportada pelo indutor. Caso o seu valor seja abaixo do necessário para o teste de cargas de baixa potência ($< 1 \text{ A}$), o seu uso será descartado.

O primeiro indutor se trata de um indutor com núcleo de ar e foi implementado pelo autor. Os seus parâmetros foram calculados pela ferramenta “RF Inductance

Calculator for Single-Layer Helical Round-Wire Coils” (STROOBANDT, 2019). Possui valor de indutância calculada de $51,42 \mu\text{H}$ e os seguintes parâmetros dimensionais: 65 mm de diâmetro; 28 voltas; 34 mm de comprimento; 0,8118 mm de diâmetro do fio (AWG 20) e corrente máxima de 9 A. O indutor implementado é apresentado na figura 14.

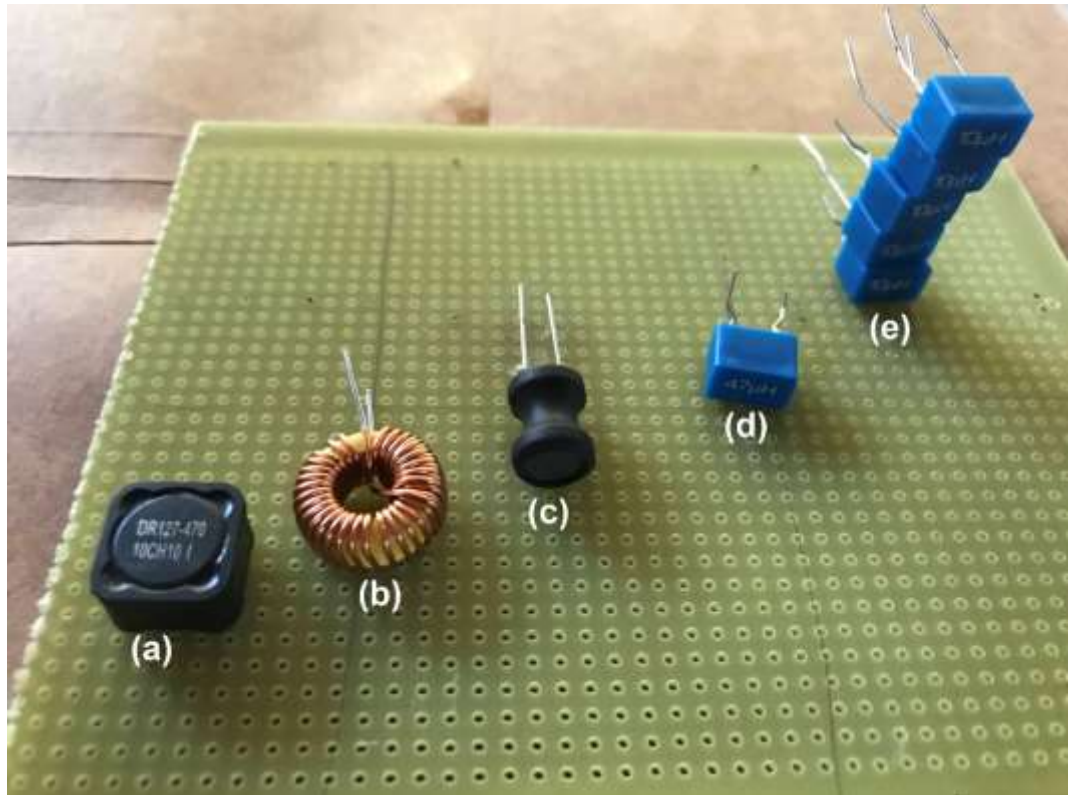
Figura 14 - Indutor de $50 \mu\text{H}$ com núcleo de ar



Fonte: Autor

A figura 15 apresenta os demais indutores testados. Todos eles são comerciais, facilmente encontrados no mercado nacional, de baixo custo e contém núcleo ferromagnético.

Figura 15 - Indutores comerciais a serem testados



Fonte: Autor

Breve descrição comercial dos indutores:

- a) indutor fixo SMD, 47 μH e corrente máxima 5,28 A
- b) indutor toroidal magnético enrolado, 56 μH e corrente máxima 3 A
- c) indutor fixo radial, 47 μH e corrente máxima 2,5 A
- d) indutor micro choque, 47 μH , marca Sontag e corrente máxima 0,31 A
- e) associação em série de 5 indutores micro choque, (5x) 10 μH , marca Sontag e corrente máxima 0,47 A.

Observações: os indutores (a), (c) e o indutor com núcleo de ar elaborado pelo autor não possuem características nominais que descartem a sua utilização na LISN. O indutor (b) possui um valor nominal de 56 μH , o que excede a tolerância de 10 % especificada pela CISPR 16-1-2 para indutores de 50 μH . A sua utilização não foi descartada a priori, pois os componentes físicos adquiridos poderiam apresentar valor medido que estivesse dentro dos limites especificados pela norma. Já o indutor (d) e a associação de indutores (e) apresentam valor máximo nominal de corrente abaixo de 1 A. Mesmo que apresentassem resultados satisfatórios nos testes realizados, a

sua utilização na implementação do circuito seria vedada, pois não atenderiam a um requisito obrigatório de implementação.

3.1.4 – Demais elementos do circuito

Serão utilizados componentes eletrônicos comerciais na implementação do restante do circuito. Como nem todos os componentes descritos na Figura 12 são de valores comerciais, serão feitas as alterações descritas a seguir:

- C1 de 8 μF será substituído por uma associação em paralelo de 4 capacitores de poliéster de 2,2 μF / 630 V;
- C2 de 0,25 μF será substituído por um capacitor de poliéster de 0,22 μF / 630 V;
- R1 de 1 k Ω é de valor comercial;
- R2 de 50 Ω será substituído por uma associação em paralelo de 2 resistores de 100 $\Omega \pm 0,1 \%$;
- R5 de 5 Ω será substituído por uma associação em paralelo de 2 resistores de 10 $\Omega \pm 10 \%$;

Os capacitores de 630 V possibilitam a utilização da LISN em redes 127 V e 220 V, sem a necessidade de utilização de chave seletora de tensão.

Além disso, para garantir um casamento de impedâncias de 50 Ω preciso na porta do analisador de espectro, a norma CISPR 16-1-2 preconiza que seja utilizado um atenuador de 10 dB, com VSWR máximo de 1,2:1, entre a porta de sinal de RF da LISN e o analisador de espectro. O atenuador pode ser inserido internamente ou externamente ao circuito da LISN. É importante observar que o sinal a ser medido pelo analisador de espectro será 10 dB abaixo do nível de emissão do DUT. A perda de inserção total da LISN será considerada e compensada nos resultados obtidos. Os valores de perda de inserção total da LISN foram levantados na etapa de caracterização da LISN. Por conta da disponibilidade do componente, será utilizado um atenuador de 10 dB, marca HP, modelo 8491A, que é apresentado na figura 16. O dispositivo foi acoplado internamente na LISN.

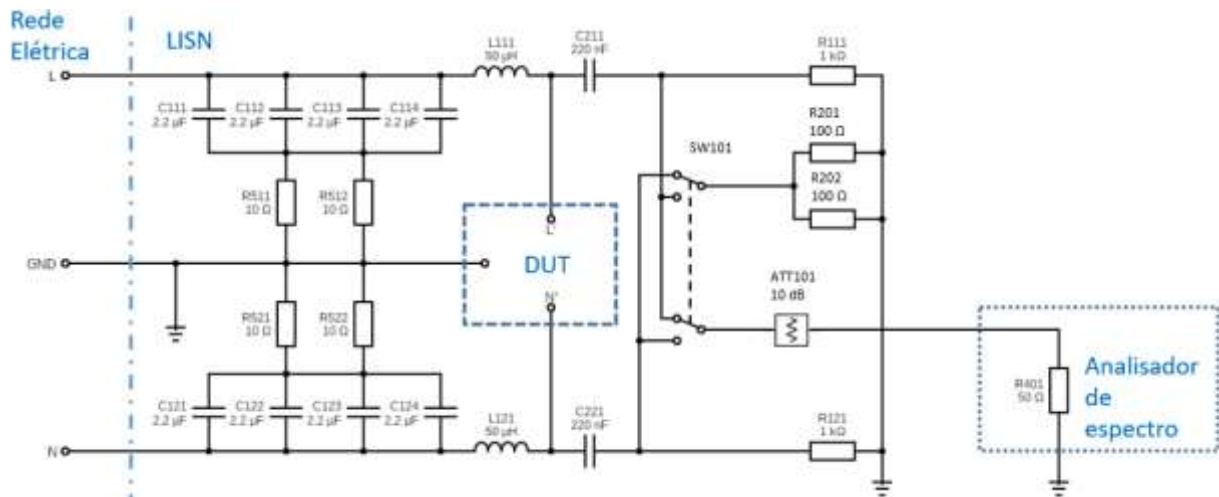
Figura 16 - Atenuador de 10 dB



Fonte: Autor

Com as alterações, o circuito passa a ter a esquematização apresentada na figura 17.

Figura 17 - Esquemático final da LISN



Fonte: Autor

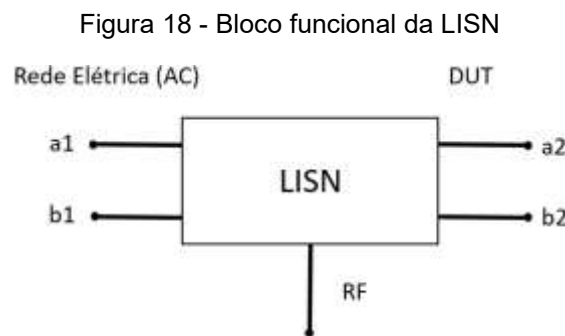
Todos os componentes utilizados na implementação do circuito da LISN (exceto o atenuador de 10 dB) foram testados utilizando-se um medidor digital RLC calibrado, marca Quadtech, modelo 1920. Foram medidos os respectivos valores de indutância, capacitância e resistência quando aplicável para cada um. As medições foram realizadas na frequência de 1 kHz. As tolerâncias nominais foram utilizadas como parâmetros de conformidade para a utilização dos capacitores e resistores. No caso dos indutores, foi considerado o valor de $50 \mu\text{H} \pm 10\%$, conforme a norma CIRPR 16-1-2. O Atenuador de 10 dB foi testado nas características de perda de inserção (atenuação) e VSWR, na faixa de 9 kHz a 30 MHz. Foi utilizado um VNA para efetuar as medições.

3.2 – Caracterização da LISN

Após a montagem do circuito da LISN, foi realizada a sua caracterização. Essa caracterização visa assegurar a confiabilidade, precisão e conformidade dos testes de EMI.

IMPORTANTE: Durante todos os testes de caracterização, a LISN deve ser mantida desconectada da rede elétrica, sob o risco de danos irreversíveis aos instrumentos de medição.

Os testes foram realizados baseados na norma CISPR 16-1-2. Para melhor entendimento de cada procedimento, a LISN será retratada como o bloco funcional da figura 18.



Fonte: Autor

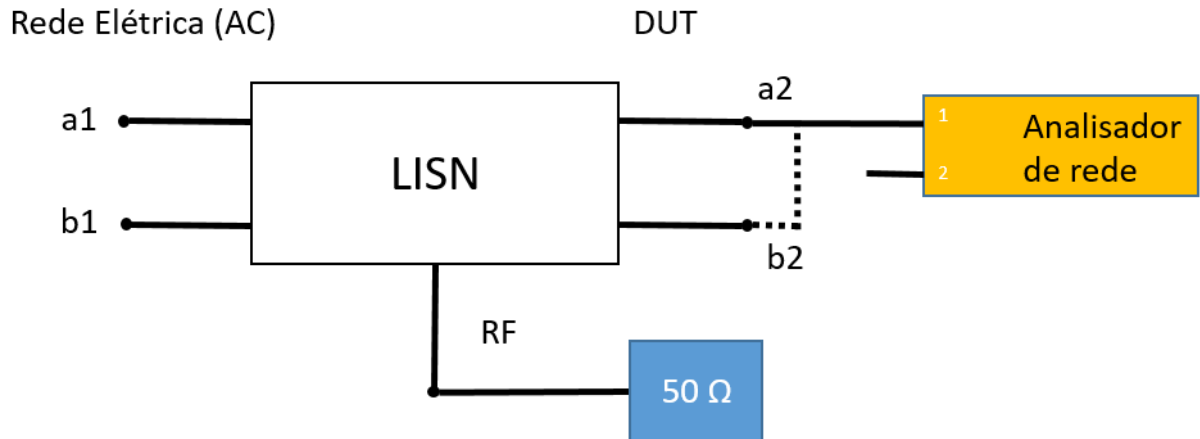
Foram caracterizadas a impedância característica da LISN (DUT - RF), perda de inserção total da LISN (DUT - RF), isolamento entre o sinal de entrada e o circuito de medição (AC - RF).

3.2.1 – Impedância característica da LISN

A impedância na porta DUT de uma LISN é uma de suas principais características, sendo importante na garantia que os ensaios de EMC sejam consistentes e comparáveis entre diferentes laboratórios e fabricantes.

A medição foi realizada entre cada linha (ponto de fase ou neutro) da porta DUT e o terra. A porta de RF foi terminada em $50\ \Omega$ e a porta de rede elétrica ficou em aberto. Para as medições foi utilizado um VNA, operando para medir impedância. A figura 19 apresenta o esquema de ligação para realização das medições de impedância.

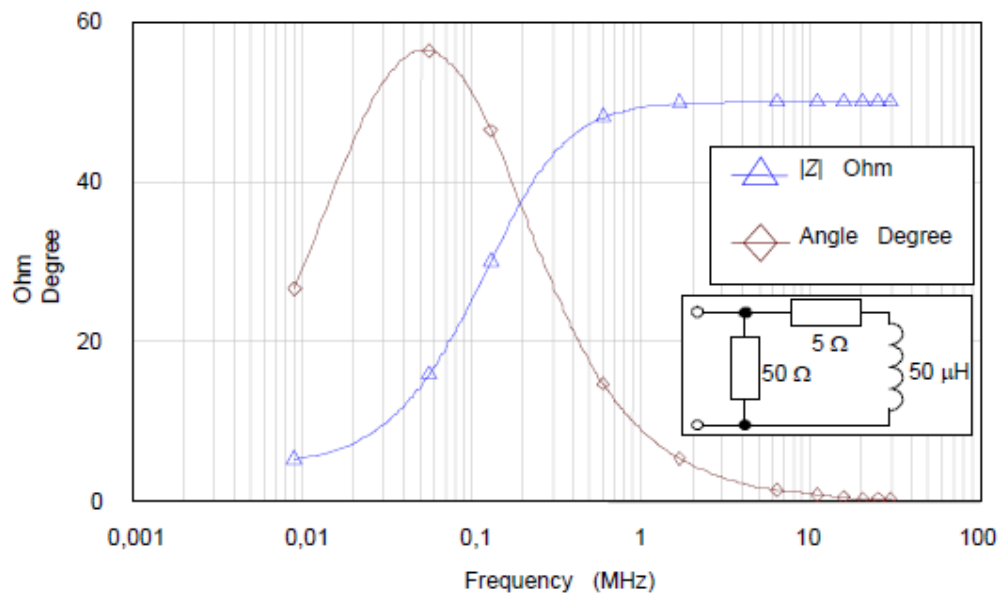
Figura 19 - Esquema de ligação para medição de impedância da LISN



Fonte: Autor

O gráfico da Figura 20 apresenta o comportamento nominal esperado da impedância de uma LISN do tipo “ $50 \Omega // (50 \mu\text{H} + 5 \Omega)$ ”.

Figura 20 - Gráfico de impedância da LISN



Fonte: IEC CISPR 16-1-2, 2014

As medições foram feitas nas mesmas frequências apresentadas nas tabelas 1 e 2 da norma CISPR 16-1-2. Os valores nominais de magnitude da impedância apresentados pela norma não consideram o circuito real da LISN (Figura 12), mas sim o seu modelo elétrico ideal (Figura 2). O circuito real adiciona os capacitores C1 e C2 e o resistor R1, conforme figura 12. Esses dispositivos alteram a impedância da LISN de maneira significativa, sobretudo no início da sua faixa de utilização. Os valores nominais a do circuito real foram calculados e são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Pontos de medição de impedância

Frequência (MHz)	Impedância (modelo elétrico) (Ω)	Impedância (circuito real) (Ω)	Diferença (%)
0,009	5,22	6,56	25,81
0,015	6,22	6,99	12,31
0,020	7,25	7,71	6,37
0,025	8,38	8,60	2,68
0,030	9,56	9,59	0,28
0,040	11,99	11,69	-2,46
0,050	14,41	13,85	-3,86
0,060	16,77	15,99	-4,64
0,070	19,04	18,07	-5,10
0,080	21,19	20,05	-5,37
0,090	23,22	21,93	-5,54
0,100	25,11	23,70	-5,64
0,150	32,72	30,86	-5,68
0,170	34,98	33,02	-5,62
0,200	37,74	35,66	-5,52
0,250	41,04	38,84	-5,37
0,300	43,25	40,98	-5,24
0,350	44,76	42,46	-5,14
0,400	45,84	43,52	-5,07
0,500	47,21	44,87	-4,97
0,600	48,02	45,66	-4,92
0,700	48,52	46,15	-4,88
0,800	48,85	46,48	-4,85
0,900	49,09	46,71	-4,83
1,000	49,26	46,88	-4,82
1,200	49,48	47,10	-4,80
2,000	49,81	47,43	-4,78
2,500	49,88	47,50	-4,77
3,000	49,92	47,54	-4,77
4,000	49,95	47,57	-4,77
5,000	49,97	47,59	-4,76
7,000	49,98	47,60	-4,76
10,000	49,99	47,61	-4,76
15,000	50,00	47,62	-4,76
20,000	50,00	47,62	-4,76
30,000	50,00	47,62	-4,76

Fonte: IEC CISPR 16-1-2, 2014 - Adaptado

De acordo com a norma CISPR 16-1-2, os valores medidos de impedância têm uma tolerância de erro de $\pm 20\%$, com relação aos valores nominais. No ponto de

9 kHz, o valor calculado de impedância do circuito real já apresenta discrepância de +25,81 % em relação ao modelo elétrico. À medida que a frequência aumenta, o sinal do erro se inverte e são observadas diferenças na ordem de -5 %.

Mesmo diante das discrepâncias observadas entre os modelos, os valores do modelo elétrico foram considerados como valores nominais, em relação aos quais os valores medidos foram testados. Dessa forma, a LISN implementada pode ser comparada com LISNs do tipo “ $50 \Omega // (50 \mu\text{H} + 5 \Omega)$ ” implementadas em diferentes vertentes e por diferentes fabricantes.

3.2.2 – Perda de inserção total da LISN

A perda de inserção total da LISN é tida como a perda no sinal de RF entre a porta DUT e a porta de RF. A sua medição é importante, pois fornece os valores de correção que devem ser aplicados às medições de EMI para compensar qualquer influência da LISN, garantindo que os resultados sejam confiáveis e precisos.

A medição ocorreu entre cada linha da porta DUT e a porta de RF. A porta de Rede Elétrica ficou em aberto. Para as medições foi utilizado um VNA, configurado para medir parâmetros S (S_{21}).

A medição de perda de inserção foi feita em duas etapas: normalização do medidor e atenuação. Ou seja, trata-se de uma medição relativa sobre os mesmos pontos de frequência da caracterização de impedância (Tabela 2)

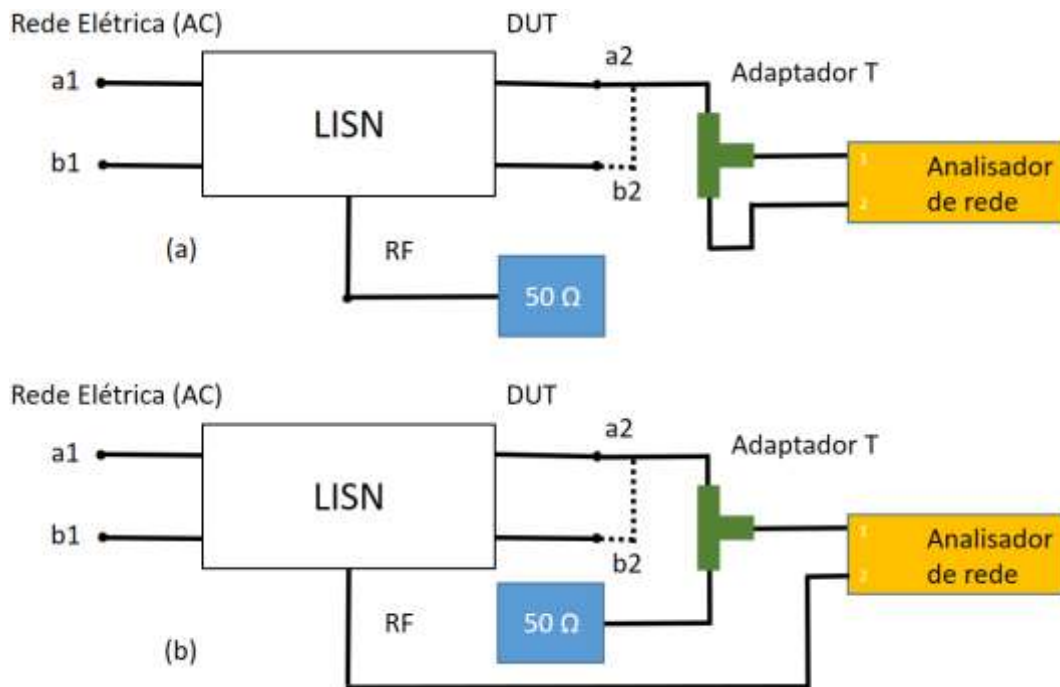
A normalização foi realizada aplicando-se o sinal proveniente da porta 1 do VNA a um adaptador T. Nas outras duas pontas do adaptador foram conectados o ponto da linha sob teste na porta DUT da LISN e a porta 2 do VNA. A saída de RF foi terminada em 50Ω . Nessa etapa foi medida a magnitude do sinal aplicado à porta DUT.

Para a medição seguinte, trocaram de posição a Terminação de 50Ω e a porta 2 do VNA.

Agora foi medido o sinal que atravessa a LISN e chega à porta de RF. As condições de casamento de impedâncias da medição anterior foram mantidas, uma vez que na troca de posição entre a Terminação de 50Ω e a porta de medição do VNA, que também é 50Ω , a impedância de ambas as portas se mantém.

A figura 21 apresenta os esquemas de ligação para realização das medições de perda de inserção.

Figura 21 - Esquema de ligação para medição de perda de inserção. (a) medição do sinal de entrada - normalização; (b) medição do sinal de saída - atenuação



Fonte: Autor

A perda de inserção foi calculada pela diferença entre as medidas de normalização e atenuação. Os valores obtidos foram utilizados na aplicação de correção dos valores medidos pelo Analisador de espectro nos testes de EMI.

3.2.3 – Isolação entre o sinal de entrada e o circuito de medição

Uma das funções de uma LISN consiste em possibilitar medições da EMI conduzida gerada por uma carga em operação. Para isso, é necessário que essa medição não sofra interferências do circuito de alimentação. Em outras palavras, os possíveis sinais de ruído presentes na rede elétrica não devem chegar até a carga ou à porta de RF.

Do ponto de vista da porta da Rede Elétrica, a LISN opera como um filtro passa-baixas, permitindo a passagem de sinais com frequências na ordem da frequência de alimentação da rede elétrica (60 Hz), ao mesmo tempo em que bloqueia a passagem de sinais na sua faixa de frequência de operação (9 kHz a 30 MHz). Esse desacoplamento é tido como a isolamento entre o sinal de entrada e o circuito de medição.

A medição de isolamento ocorreu entre cada linha da porta de Rede Elétrica e a porta de RF. A porta DUT ficou em aberto. Para as medições foi utilizado um VNA, operando para medir parâmetros S (S_{21}).

A medição de isolamento, assim como a medição de perda de inserção, foi feita em duas etapas: normalização do medidor e atenuação. Ou seja, trata-se de uma medição relativa. Foram considerados os mesmos pontos de frequência da caracterização de impedância (Tabela 2).

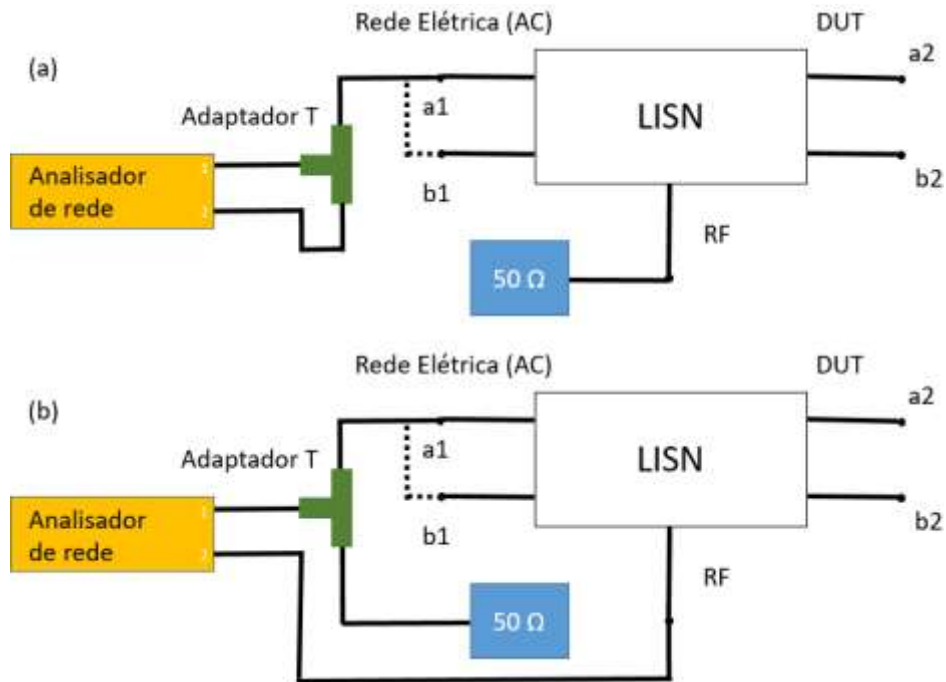
A normalização foi realizada aplicando-se o sinal proveniente da porta 1 do VNA a um adaptador T. Nas outras duas pontas do adaptador foram conectados o ponto da linha que estava sendo testada na porta de Rede Elétrica da LISN e a porta 2 do VNA. A saída de RF foi terminada em $50\ \Omega$. Nessa etapa foi medida a magnitude do sinal aplicado à porta DUT.

Para a medição seguinte, trocaram de posição a Terminação de $50\ \Omega$ e a porta 2 do VNA.

Nessas condições, foi medido o sinal que atravessa a LISN e chega à porta de RF. As condições de casamento de impedâncias da medição anterior foram mantidas, uma vez que na troca de posição entre a Terminação de $50\ \Omega$ e a porta de medição do VNA, que também é $50\ \Omega$, a impedância de ambas as portas se mantém.

A figura 22 apresenta os esquemas de ligação para realização das medições de isolamento da entrada.

Figura 22 - Esquema de ligação para medição de isolamento da entrada (a) medição do sinal de entrada normalização; (b) medição do sinal de saída - atenuação



Fonte: Autor

A Isolação foi calculada pela diferença entre as medidas de normalização e atenuação.

De acordo com a norma CISPR 16-1-2, uma isolamento mínima de 40 dB é estabelecida como requisito aceitável. Isso é importante para manter a interferência proveniente da rede elétrica separada do sinal de RF que está sendo medido. A interferência da rede elétrica pode introduzir ruído e distorção nos resultados das medições, afetando a avaliação precisa dos níveis de emissão de um dispositivo. Além disso, a isolamento auxilia na prevenção de que o sinal de RF gerado pela carga afete a rede elétrica, o que é necessário para cumprir os regulamentos de emissão eletromagnética.

3.3 – Ensaio de emissão conduzida

A realização de ensaios de emissão conduzida é a principal aplicação de uma LISN, e ocorre nas etapas de pré-certificação (*pre-compliance*) e certificação de produtos eletroeletrônicos. Nestes ensaios são realizadas medições de EMI geradas por um DUT e os resultados são comparados com os limites admissíveis pelas normas vigentes, podendo resultar aprovação ou reprovação do DUT no quesito de emissão conduzida de ruído eletromagnético.

Com o objetivo de testar o funcionamento da LISN implementada, foram testadas 3 cargas com perfis distintos, medindo-se as respectivas EMI conduzidas geradas e comparando os resultados obtidos com os limites estabelecidos pela norma CISPR-11 e apresentados na tabela 1.

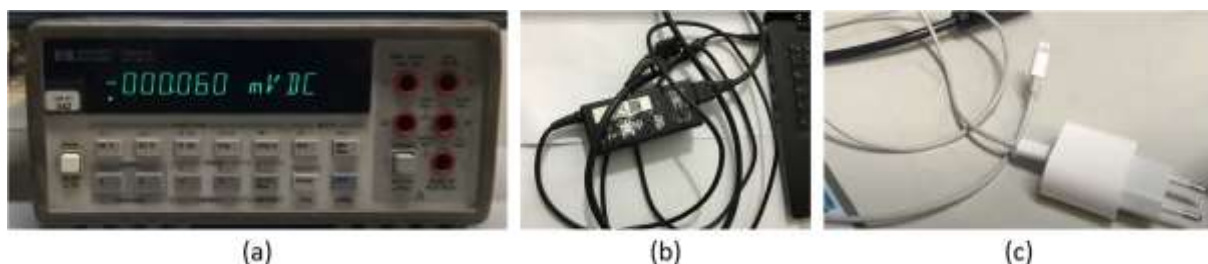
Os ensaios foram realizados nas instalações permanentes do Laboratório de Metrologia Elétrica – LME do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. O laboratório em que foram realizados os testes não dispõe de câmara anecóica ou qualquer ambiente eletromagneticamente blindado.

A primeira carga testada foi um multímetro digital 6 ½ dígitos, marca HP, modelo 34401A, apresentado na Figura 23 (a). Trata-se de um instrumento de precisão, para uso em laboratório, que realiza medições de sinais elétricos em baixa frequência.

A segunda carga testada foi um carregador de notebook, marca Dell, modelo LA65NS2-01, apresentado na Figura 23 (b). O carregador foi ensaiado enquanto realizava a carga de bateria em um notebook, marca Dell, modelo P92G001. Durante o ensaio o notebook estava em funcionamento em condições normais.

A terceira carga testada foi um carregador de celular, sem indicação de marca e modelo, compatível com telefone celular iPhone, apresentado na Figura 23 (c). Este carregador não é homologado pela Anatel. O carregador foi ensaiado enquanto realizava a carga de bateria em um celular, marca Apple, modelo iPhone 7. Durante o ensaio o celular estava em funcionamento.

Figura 23 - Cargas para teste de emissão conduzida: (a) multímetro de bancada; (b) carregador de notebook original; (c) carregador de celular não homologado



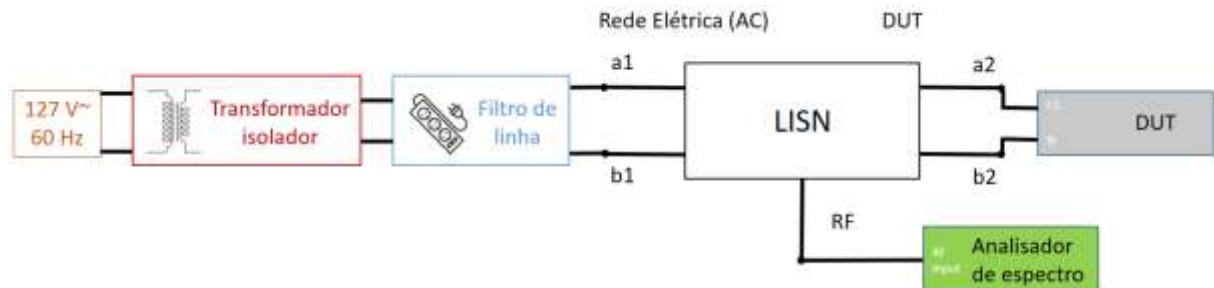
Fonte: Autor

Todas as cargas testadas atendem ao critério de corrente máxima admissível para utilização da LISN (2 A).

Com o intuito de reduzir os possíveis ruídos provenientes da rede elétrica, foram utilizados um transformador isolador (relação 1:1) e um filtro de linha comercial entre a tomada da rede elétrica e a porta de rede elétrica da LISN.

As cargas foram alimentadas com tensão eficaz de 127 V, 60 Hz e forma de onda senoidal. A Figura 24 apresenta o diagrama de ligação para os ensaios de emissão conduzida.

Figura 24 - Diagrama de ligação para o ensaio de emissão conduzida



Fonte: Autor

As medições foram realizadas utilizando-se um analisador de espectro calibrado, marca Agilent, modelo PXA N9030A, configurado com: unidade: dB μ V; acoplamento: DC; atenuador interno: 30 dB; nível de referência: 90 dB μ V; freq. inicial: 150 kHz; freq. final: 30 MHz; RBW: 9 kHz; VBW: Auto; traço: médio (100); detector: “quasi-peak” e “average”; ref. offset (compensação da perda de inserção total da LISN): 10 dB; limite: conforme apresentado previamente na Tabela 1.

4 – Resultados e Discussão

4.1 – Teste dos componentes

São apresentados a seguir os resultados das medições realizadas nos componentes eletrônicos utilizados na montagem da LISN.

4.1.1 – Indutor de 50 μH

Para a seleção do indutor de 50 μH que melhor atende à proposta do circuito da LISN, foram realizados testes com os arranjos (a) a (e) (conforme mostrado na Figura 15) e o indutor desenvolvido pelo autor, agora denominado arranjo (f). Esses testes abrangeram características como indutância na frequência mínima de operação (9 kHz), frequência de ressonância, impedância na frequência de ressonância, número de picos de ressonância na faixa de operação e impedância na frequência máxima de operação (30 MHz).

Além disso, as correntes máximas nominais de cada arranjo foram avaliadas, e estabeleceu-se um limite mínimo de 1 A como critério para a elegibilidade do indutor. Os resultados desses testes estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados nos testes dos indutores

Arranjo	$L_9 \text{ kHz}$ (μH)	f_r (MHz)	Z_{fr} (Ω)	n_{PICOS}	$Z_{30 \text{ MHz}}$ (Ω)	$I_{\text{máx}}$ (A)
(a)	45,921	9,50	33854,6	1	708,2	5,28
(b)	51,909	24,00	1618,1	1	1511,1	3,00
(c)	44,461	10,00	38891,5	1	722,0	2,50
(d)	42,175	12,00	34895,8	1	1436,7	0,31
(e)	50,263	10,00	73413,4	2	1434,8	0,47
(f)	49,149	5,00	792,4	1	280,9	9,00

Fonte: Autor

Os arranjos (c) e (d) não atenderam ao requisito de indutância na frequência mínima de operação da LISN, extrapolando a faixa de $(50 \pm 5) \mu\text{H}$, portanto, não são adequados para o projeto.

O arranjo (e), composto pela associação em série de 5 indutores de 10 μH , apresentou mais de 1 pico de ressonância na faixa de utilização da LISN, o que

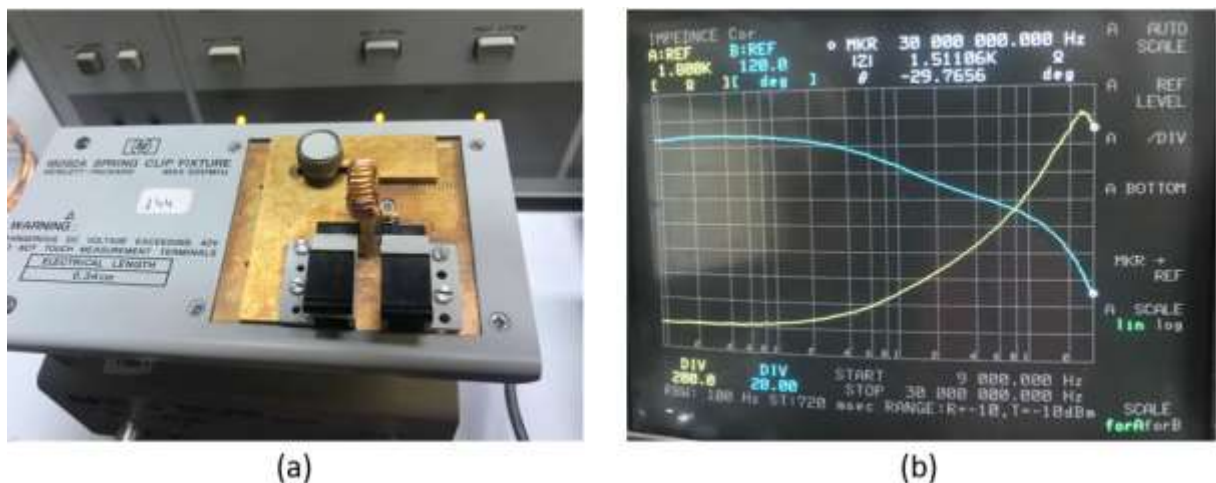
resultaria em instabilidade de comportamento nas frequências acima da ressonância e também foi descartado.

Além disso, os arranjos (d) e (e), que já tiveram sua elegibilidade comprometida pelos critérios anteriores, também não atendem ao requisito de corrente máxima nominal.

Entre os arranjos elegíveis restantes, o arranjo (b) obteve os melhores resultados, com uma frequência de ressonância mais alta e maior impedância na frequência de 30 MHz. Portanto, optou-se pelo indutor toroidal com valor nominal de 56 μH e corrente máxima de 3 A para integrar o circuito.

A Figura 25 (a) mostra o indutor que apresentou os melhores resultados e que será utilizado na implementação do circuito e (b) a sua curva de impedâncias.

Figura 25 - (a) indutor toroidal durante as medições; (b) curva de impedância e fase do indutor



Fonte: Autor

A LISN implementada passou a ter como limitador de uso a corrente na carga. Como margem de segurança, foi adotado um limite máximo de corrente de 2 A, que representa 2/3 da corrente máxima suportada pelo indutor.

4.1.2 – Resistores, indutores e capacitores – 1 kHz

Utilizando o Medidor RLC, foram realizadas medições, na frequência de 1 kHz, em todos os resistores, capacitores e indutores usados na implementação da LISN, conforme mostrado nas figuras 26 (a) e (b).

Figura 26 - Medições do (a) R121 e (b) C211 utilizando o medidor RLC



Fonte: Autor

Para resistores e capacitores, as tolerâncias nominais foram adotadas como critério de aceitação. No caso dos indutores, foi aplicado o intervalo $(50 \pm 5) \mu\text{H}$, conforme especificado pela norma CISPR 16-1-2. As identificações de referência de cada componente seguem a disposição apresentada no Esquemático final da LISN (Figura 17).

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados dos testes dos componentes da LISN em 1 kHz

Referência	Valor nominal	Valor medido	Erro	Tolerância	Avaliação
R111	1 kΩ	1,0010 kΩ	0,10 %	0,1 %	OK
R121	1 kΩ	1,0004 kΩ	0,040 %	0,1 %	OK
R201	100 Ω	100,086 Ω	0,086 %	0,1 %	OK
R202	100 Ω	100,094 Ω	0,094 %	0,1 %	OK
R511	10 Ω	9,8996 Ω	-1,00 %	10 %	OK
R512	10 Ω	10,018 Ω	0,18 %	10 %	OK
R521	10 Ω	10,019 Ω	0,19 %	10 %	OK
R522	10 Ω	9,6711 Ω	-3,3 %	10 %	OK
C111	2,2 μF	2,2110 μF	0,5 %	5 %	OK
C112	2,2 μF	2,2415 μF	1,9 %	5 %	OK
C113	2,2 μF	2,2191 μF	0,87 %	5 %	OK
C114	2,2 μF	2,2569 μF	2,59 %	5 %	OK
C121	2,2 μF	2,2315 μF	1,4 %	5 %	OK
C122	2,2 μF	2,2131 μF	0,60 %	5 %	OK
C123	2,2 μF	2,1932 μF	-0,31 %	5 %	OK
C124	2,2 μF	2,1972 μF	-0,13 %	5 %	OK
C211	220 nF	217,847 nF	-0,98 %	5 %	OK
C221	220 nF	217,895 nF	-0,96 %	5 %	OK
L111	50 μH	51,071 μH	2,1 %	10 %	OK
L121	50 μH	50,898 μH	1,8 %	10 %	OK

Fonte: Autor

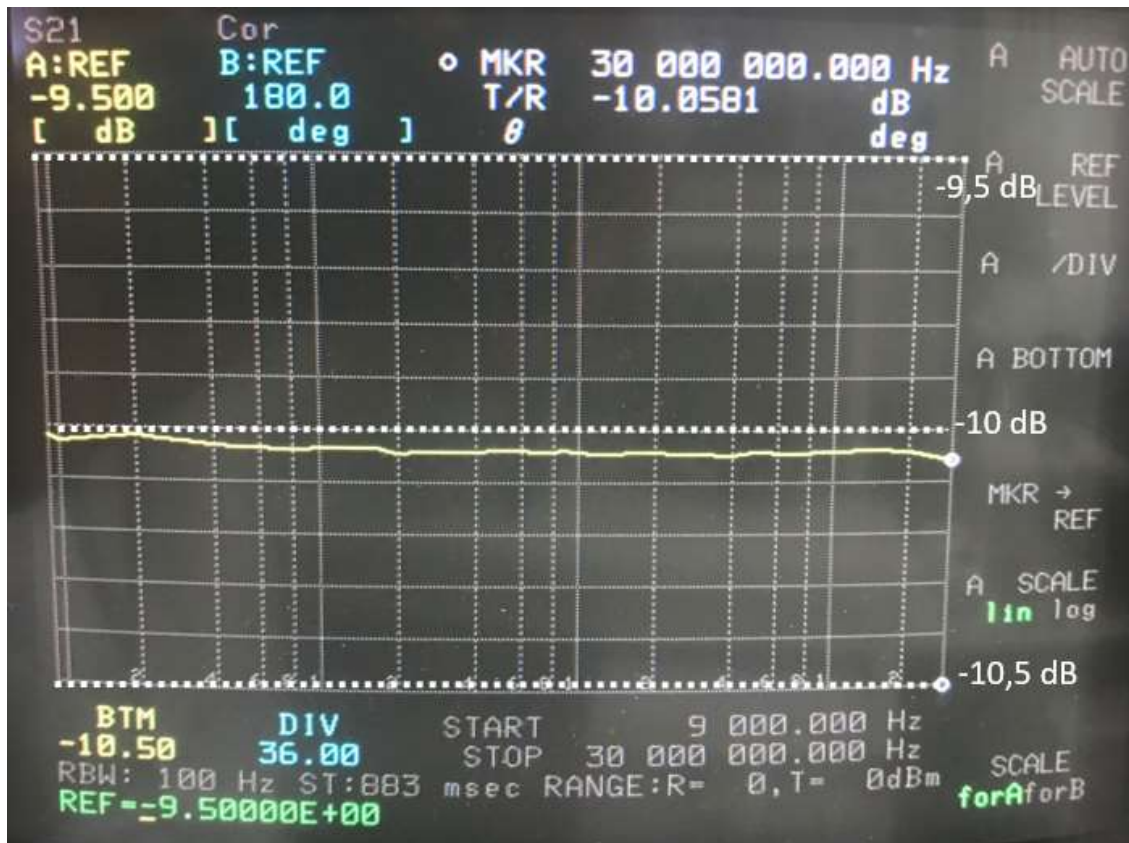
Os componentes testados demonstraram resultados em conformidade com as especificações, o que é fundamental para assegurar o bom funcionamento do circuito. Todos eles foram utilizados na implementação do projeto, contribuindo para um desempenho consistente e confiável.

4.1.3 – Atenuador de 10 dB

O Atenuador de 10 dB, modelo 8491A, possui especificações (na faixa de 9 kHz a 30 MHz) de exatidão de atenuação de $\pm 0,5$ dB e VSWR de $<1,2:1$.

A curva de atenuação medida é apresentada na Figura 27.

Figura 27 - Atenuação medida no atenuador de 10 dB

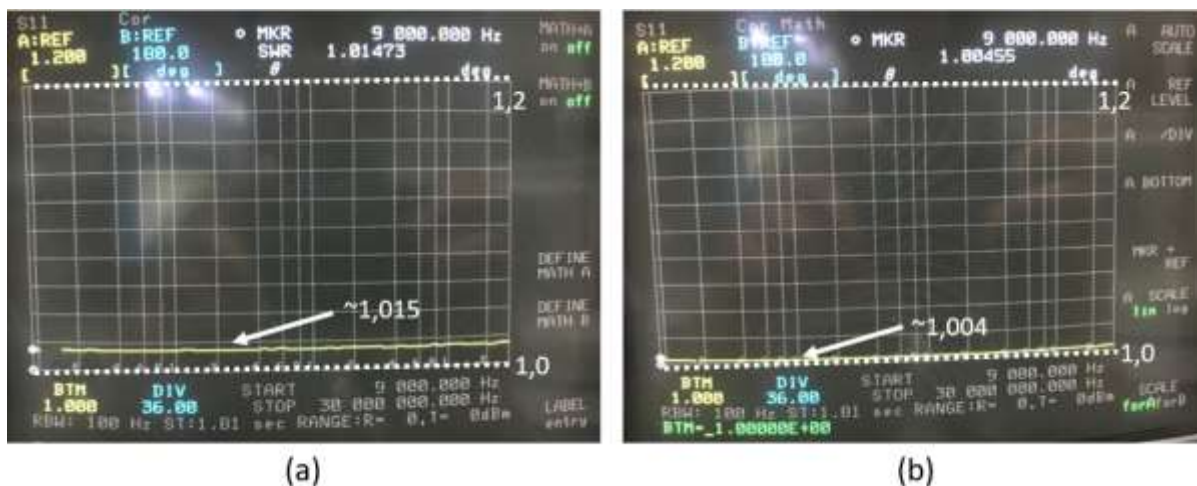


Fonte: Autor

Os resultados indicam que o atenuador mantém o comportamento de atenuação dentro das especificações na faixa de 9 kHz até 30 MHz. A maior discrepância foi observada na frequência de 30 MHz, com uma atenuação de 10,06 dB.

Já as curvas de VSWR das portas (m) e (f) do atenuador são apresentadas respectivamente nas figuras 28 (a) e 28 (b).

Figura 28 - Curvas de VSWR do Atenuador de 10 dB. (a) curva na porta (m); (b) curva na porta (f)



Fonte: Autor

Para ambas as portas os valores medidos ficaram abaixo do limite de 1,2:1, cumprindo assim o requisito da norma CISPR 16-1-2 para o atenuador de 10 dB.

4.2 – Montagem do circuito

O circuito esquematizado na Figura 17 foi montado utilizando os componentes caracterizados no Capítulo 4.1.2. Utilizou-se uma PCI universal (também conhecida como 'placa ilhada') de 10 cm x 10 cm para a conexão dos componentes. A montagem final da placa é apresentada na Figura 29 (a).

A porta de RF é disponibilizada ao usuário por meio de uma conexão coaxial tipo N. Para as portas de rede elétrica e DUT, foram utilizados um cabo de energia e uma tomada, respectivamente. Ambas as conexões são do tipo 'tomada de 3 pinos' (NBR 14136), com aterramento e modelo padrão de 10 A.

A LISN montada foi acomodada em uma caixa plástica com dimensões (L x A x P) 16,0 cm x 5,0 cm x 11,5 cm. A montagem na caixa é apresentada na Figura 29 (b).

Figura 29 – (a) montagem do circuito da LISN na PCI; (b) LISN acoplada na caixa plástica



Fonte: Autor

4.3 – Caracterização da LISN

A seguir, serão apresentados os resultados de caracterização da LISN completa em impedância característica, perda de inserção total e isolamento. Os resultados das linhas L1 e N serão reportadas separadamente e em sequência para cada caracterização realizada.

4.3.1 – Impedância característica da LISN

A primeira caracterização realizada na LISN implementada foi da sua impedância característica.

O resultado do erro (diferença percentual entre o valor nominal e o valor medido) foi testado contra a tolerância de 20 % especificada na norma CISPR 16-1-2.

Os resultados da linha L1 são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Caracterização de impedância - L1

Frequência	Valor nominal	Valor medido	Erro	Tolerância	Conclusão
(MHz)	(mod. elétr.) (Ω)	(Ω)	(%)	(%)	
0,009	5,22	5,62	-7,12	20	OK
0,015	6,22	6,10	1,97	20	OK
0,020	7,25	6,86	5,69	20	OK
0,025	8,38	7,70	8,83	20	OK
0,030	9,56	8,62	10,90	20	OK
0,040	11,99	10,56	13,54	20	OK
0,050	14,41	12,52	15,10	20	OK
0,060	16,77	14,46	15,98	20	OK
0,070	19,04	16,32	16,67	20	OK
0,080	21,19	18,11	17,01	20	OK
0,090	23,22	19,80	17,27	20	OK
0,100	25,11	21,39	17,39	20	OK
0,150	32,72	27,98	16,94	20	OK
0,170	34,98	30,03	16,48	20	OK
0,200	37,74	32,60	15,77	20	OK
0,250	41,04	35,83	14,54	20	OK
0,300	43,25	38,11	13,49	20	OK
0,350	44,76	39,78	12,52	20	OK
0,400	45,84	41,03	11,72	20	OK
0,500	47,21	42,75	10,43	20	OK
0,600	48,02	43,85	9,51	20	OK
0,700	48,52	44,59	8,81	20	OK
0,800	48,85	45,12	8,27	20	OK
0,900	49,09	45,51	7,87	20	OK
1,000	49,26	45,81	7,53	20	OK
1,200	49,48	46,22	7,05	20	OK
2,000	49,81	46,90	6,20	20	OK
2,500	49,88	47,05	6,01	20	OK
3,000	49,92	47,15	5,87	20	OK
4,000	49,95	47,26	5,69	20	OK
5,000	49,97	47,33	5,58	20	OK
7,000	49,98	47,44	5,35	20	OK
10,000	49,99	47,60	5,02	20	OK
15,000	50,00	47,95	4,28	20	OK
20,000	50,00	48,42	3,26	20	OK
30,000	50,00	49,65	0,70	20	OK

Fonte: Autor

A curva de impedância medida da linha L1 é apresentada na figura 30.

Figura 30 - Gráfico da medição de impedância - L1



Fonte: Autor

Os resultados obtidos mostram que a característica de impedância da linha L1 da LISN apresentou resultados em conformidade com a tolerância em toda a faixa de operação.

Para a linha N, os resultados são apresentados na Tabela 6.

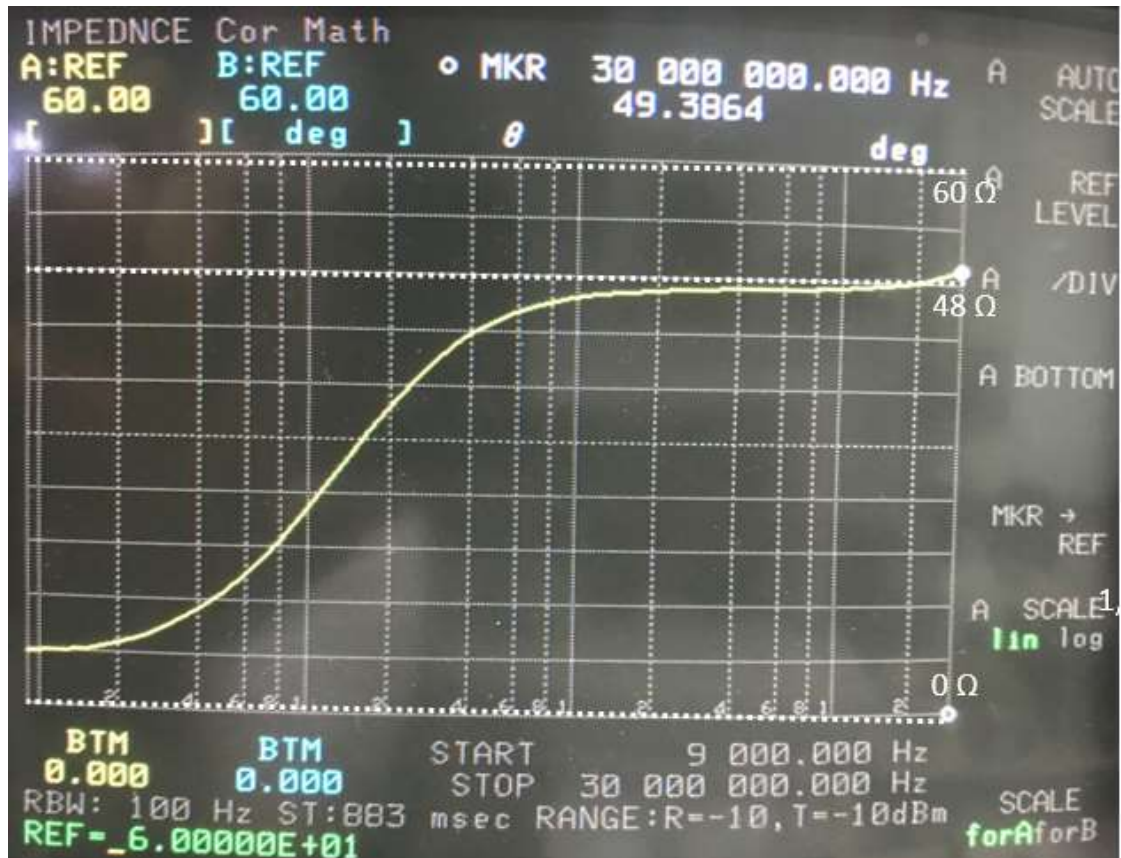
Tabela 6 - Caracterização de impedância - N

Frequência	Valor nominal	Valor medido	Erro	Tolerância	Conclusão
(MHz)	(mod. elétr.)				
(MHz)	(Ω)	(Ω)	(%)	(%)	
0,009	5,22	5,82	-10,31	20	OK
0,015	6,22	6,31	-1,43	20	OK
0,020	7,25	7,08	2,40	20	OK
0,025	8,38	7,95	5,41	20	OK
0,030	9,56	8,89	7,54	20	OK
0,040	11,99	10,88	10,20	20	OK
0,050	14,41	12,91	11,62	20	OK
0,060	16,77	14,91	12,47	20	OK
0,070	19,04	16,83	13,13	20	OK
0,080	21,19	18,67	13,50	20	OK
0,090	23,22	20,40	13,82	20	OK
0,100	25,11	22,04	13,93	20	OK
0,150	32,72	28,72	13,93	20	OK
0,170	34,98	30,78	13,65	20	OK
0,200	37,74	33,34	13,20	20	OK
0,250	41,04	36,52	12,38	20	OK
0,300	43,25	38,73	11,67	20	OK
0,350	44,76	40,33	10,98	20	OK
0,400	45,84	41,51	10,43	20	OK
0,500	47,21	43,09	9,56	20	OK
0,600	48,02	44,08	8,94	20	OK
0,700	48,52	44,73	8,47	20	OK
0,800	48,85	45,19	8,10	20	OK
0,900	49,09	45,52	7,84	20	OK
1,000	49,26	45,76	7,65	20	OK
1,200	49,48	46,10	7,33	20	OK
2,000	49,81	46,63	6,82	20	OK
2,500	49,88	46,75	6,70	20	OK
3,000	49,92	46,83	6,60	20	OK
4,000	49,95	46,91	6,48	20	OK
5,000	49,97	46,97	6,39	20	OK
7,000	49,98	47,07	6,18	20	OK
10,000	49,99	47,22	5,87	20	OK
15,000	50,00	47,59	5,06	20	OK
20,000	50,00	48,06	4,04	20	OK
30,000	50,00	49,39	1,24	20	OK

Fonte: Autor

A curva de impedância medida da linha N é apresentada na figura 31.

Figura 31 - Gráfico da medição de impedância - N



Fonte: Autor

Os resultados obtidos mostram que a característica de impedância da linha N da LISN, assim como na linha L1, apresentaram resultados em conformidade com a tolerância em toda a faixa de operação, o que contribui para a confiabilidade e repetibilidade dos testes de EMC.

4.3.2 – Perda de inserção total da LISN

A segunda caracterização realizada foi a perda de inserção da LISN. O resultado do valor medido foi utilizado na correção dos valores obtidos no ensaio de EMC. Foram considerados como valor nominal e tolerância, as especificações do atenuador de 10 dB ($10 \text{ dB} \pm 0,5 \text{ dB}$). Os resultados da linha L1 estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Caracterização de perda de inserção - L1

Frequência (MHz)	Valor nominal (dB)	Valor medido (dB)	Erro (dB)	Tolerância (dB)	Conclusão
0,009	10,00	10,03	-0,03	0,50	OK
0,015	10,00	10,02	-0,02	0,50	OK
0,020	10,00	10,02	-0,02	0,50	OK
0,025	10,00	10,02	-0,02	0,50	OK
0,030	10,00	10,03	-0,03	0,50	OK
0,040	10,00	10,03	-0,03	0,50	OK
0,050	10,00	10,04	-0,04	0,50	OK
0,060	10,00	10,04	-0,04	0,50	OK
0,070	10,00	10,05	-0,05	0,50	OK
0,080	10,00	10,06	-0,06	0,50	OK
0,090	10,00	10,06	-0,06	0,50	OK
0,100	10,00	10,07	-0,07	0,50	OK
0,150	10,00	10,08	-0,08	0,50	OK
0,170	10,00	10,09	-0,09	0,50	OK
0,200	10,00	10,09	-0,09	0,50	OK
0,250	10,00	10,10	-0,10	0,50	OK
0,300	10,00	10,10	-0,10	0,50	OK
0,350	10,00	10,10	-0,10	0,50	OK
0,400	10,00	10,10	-0,10	0,50	OK
0,500	10,00	10,10	-0,10	0,50	OK
0,600	10,00	10,10	-0,10	0,50	OK
0,700	10,00	10,10	-0,10	0,50	OK
0,800	10,00	10,11	-0,11	0,50	OK
0,900	10,00	10,11	-0,11	0,50	OK
1,000	10,00	10,11	-0,11	0,50	OK
1,200	10,00	10,12	-0,12	0,50	OK
2,000	10,00	10,12	-0,12	0,50	OK
2,500	10,00	10,11	-0,11	0,50	OK
3,000	10,00	10,11	-0,11	0,50	OK
4,000	10,00	10,11	-0,11	0,50	OK
5,000	10,00	10,11	-0,11	0,50	OK
7,000	10,00	10,12	-0,12	0,50	OK
10,000	10,00	10,13	-0,13	0,50	OK
15,000	10,00	10,12	-0,12	0,50	OK
20,000	10,00	10,13	-0,13	0,50	OK
30,000	10,00	10,18	-0,18	0,50	OK

Fonte: Autor

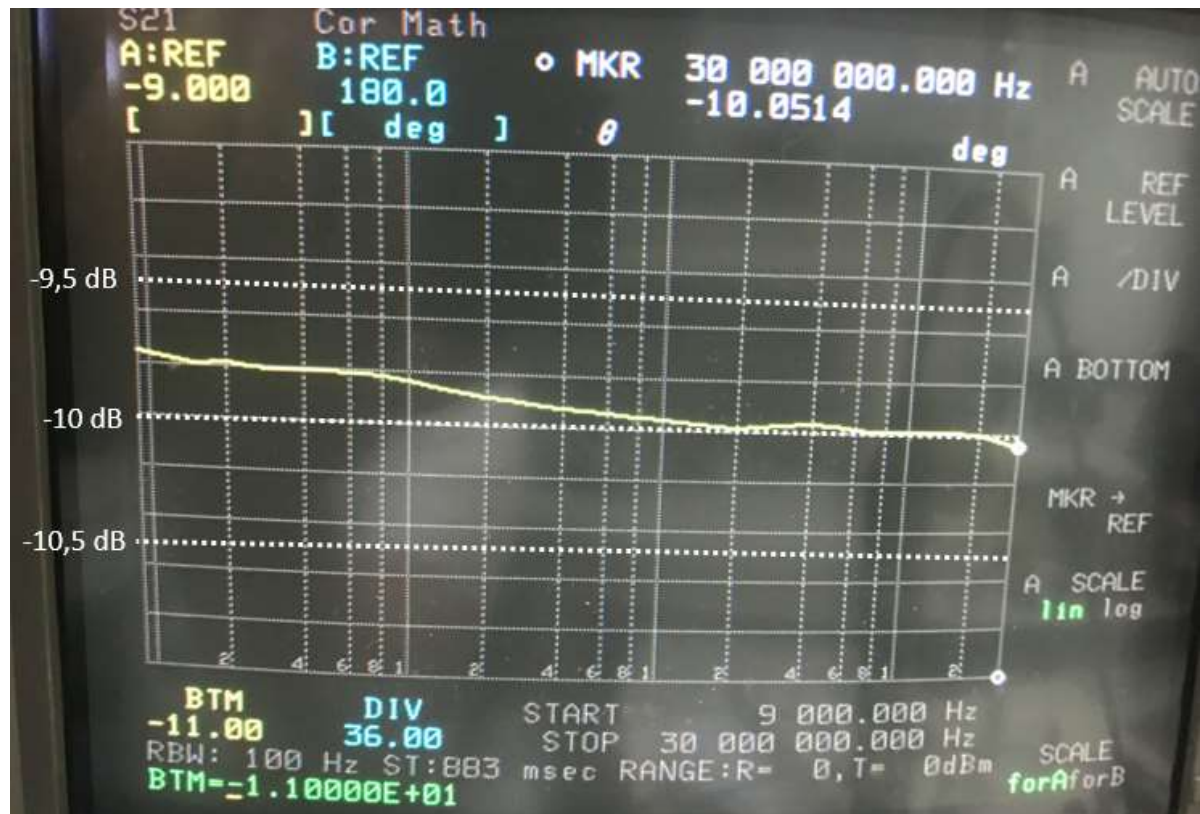
Tabela 8 - Caracterização de perda de inserção - N

Frequência (MHz)	Valor nominal (dB)	Valor medido (dB)	Erro (dB)	Tolerância (dB)	Conclusão
0,009	10,00	9,75	0,25	0,50	OK
0,015	10,00	9,79	0,21	0,50	OK
0,020	10,00	9,79	0,21	0,50	OK
0,025	10,00	9,80	0,20	0,50	OK
0,030	10,00	9,80	0,20	0,50	OK
0,040	10,00	9,81	0,19	0,50	OK
0,050	10,00	9,81	0,19	0,50	OK
0,060	10,00	9,81	0,19	0,50	OK
0,070	10,00	9,82	0,18	0,50	OK
0,080	10,00	9,82	0,18	0,50	OK
0,090	10,00	9,83	0,17	0,50	OK
0,100	10,00	9,84	0,16	0,50	OK
0,150	10,00	9,87	0,13	0,50	OK
0,170	10,00	9,88	0,12	0,50	OK
0,200	10,00	9,89	0,11	0,50	OK
0,250	10,00	9,90	0,10	0,50	OK
0,300	10,00	9,91	0,09	0,50	OK
0,350	10,00	9,92	0,08	0,50	OK
0,400	10,00	9,92	0,08	0,50	OK
0,500	10,00	9,93	0,07	0,50	OK
0,600	10,00	9,94	0,06	0,50	OK
0,700	10,00	9,95	0,05	0,50	OK
0,800	10,00	9,95	0,05	0,50	OK
0,900	10,00	9,95	0,05	0,50	OK
1,000	10,00	9,96	0,04	0,50	OK
1,200	10,00	9,97	0,03	0,50	OK
2,000	10,00	9,98	0,02	0,50	OK
2,500	10,00	9,98	0,02	0,50	OK
3,000	10,00	9,97	0,03	0,50	OK
4,000	10,00	9,97	0,03	0,50	OK
5,000	10,00	9,97	0,03	0,50	OK
7,000	10,00	9,99	0,01	0,50	OK
10,000	10,00	9,99	0,01	0,50	OK
15,000	10,00	9,99	0,01	0,50	OK
20,000	10,00	10,00	0,00	0,50	OK
30,000	10,00	10,05	-0,05	0,50	OK

Fonte: Autor

A curva de perda de inserção medida da linha N é apresentada na figura 33.

Figura 33 - Gráfico da medição de perda de inserção - N



Fonte: Autor

Os resultados obtidos mostram que a perda de inserção da linha N da LISN, assim como na linha L1, apresentaram resultados em conformidade com a tolerância em toda a faixa de operação, o que contribui para a confiabilidade e repetibilidade dos testes de EMC. Como os resultados obtidos para L1 e N apresentaram conformidade com a tolerância estabelecida, o valor de 10 dB foi considerado como fator de correção para as medições de emissão conduzida no teste de EMC.

4.3.3 - Isolação entre o sinal de entrada e o circuito de medição

A terceira caracterização realizada foi a isolamento entre a porta de rede elétrica e a porta de RF da LISN. É estabelecido que o sinal incidente na porta da rede elétrica seja atenuado acima de 40 dB ao alcançar a porta de RF, o que torna efetiva a isolamento do ruído presente na rede perante o circuito de medição.

Os resultados da linha L1 estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Caracterização de isolamento - L1

Frequência (MHz)	Limite admissível ≥ (dB)	Valor medido (dB)	Conclusão
0,009	40,00	16,52	Não conforme
0,015	40,00	13,66	Não conforme
0,020	40,00	12,48	Não conforme
0,025	40,00	11,91	Não conforme
0,030	40,00	11,62	Não conforme
0,040	40,00	11,47	Não conforme
0,050	40,00	11,59	Não conforme
0,060	40,00	11,85	Não conforme
0,070	40,00	12,18	Não conforme
0,080	40,00	12,56	Não conforme
0,090	40,00	12,96	Não conforme
0,100	40,00	13,37	Não conforme
0,150	40,00	15,44	Não conforme
0,170	40,00	16,21	Não conforme
0,200	40,00	17,30	Não conforme
0,250	40,00	18,91	Não conforme
0,300	40,00	20,30	Não conforme
0,350	40,00	21,52	Não conforme
0,400	40,00	22,62	Não conforme
0,500	40,00	24,48	Não conforme
0,600	40,00	26,07	Não conforme
0,700	40,00	27,45	Não conforme
0,800	40,00	28,66	Não conforme
0,900	40,00	29,74	Não conforme
1,000	40,00	30,72	Não conforme
1,200	40,00	32,49	Não conforme
2,000	40,00	37,48	Não conforme
2,500	40,00	39,52	Não conforme
3,000	40,00	41,08	OK
4,000	40,00	43,25	OK
5,000	40,00	44,62	OK
7,000	40,00	46,10	OK
10,000	40,00	46,99	OK
15,000	40,00	47,30	OK
20,000	40,00	47,14	OK
30,000	40,00	46,22	OK

Fonte: Autor

A curva de isolamento medida da linha L1 é apresentada na figura 34.

Figura 34 - Gráfico da medição de isolamento - L1



Fonte: Autor

Os resultados obtidos mostram que a isolamento da linha L1 da LISN apresentou resultados em conformidade com a tolerância apenas nas frequências acima de 2,6 MHz. Abaixo dessa frequência foram observados valores fora do limite admissível, com pior caso na frequência de 40 kHz, cuja isolamento medida foi de 11,5 dB.

Para a linha N, os resultados são apresentados na Tabela 10.

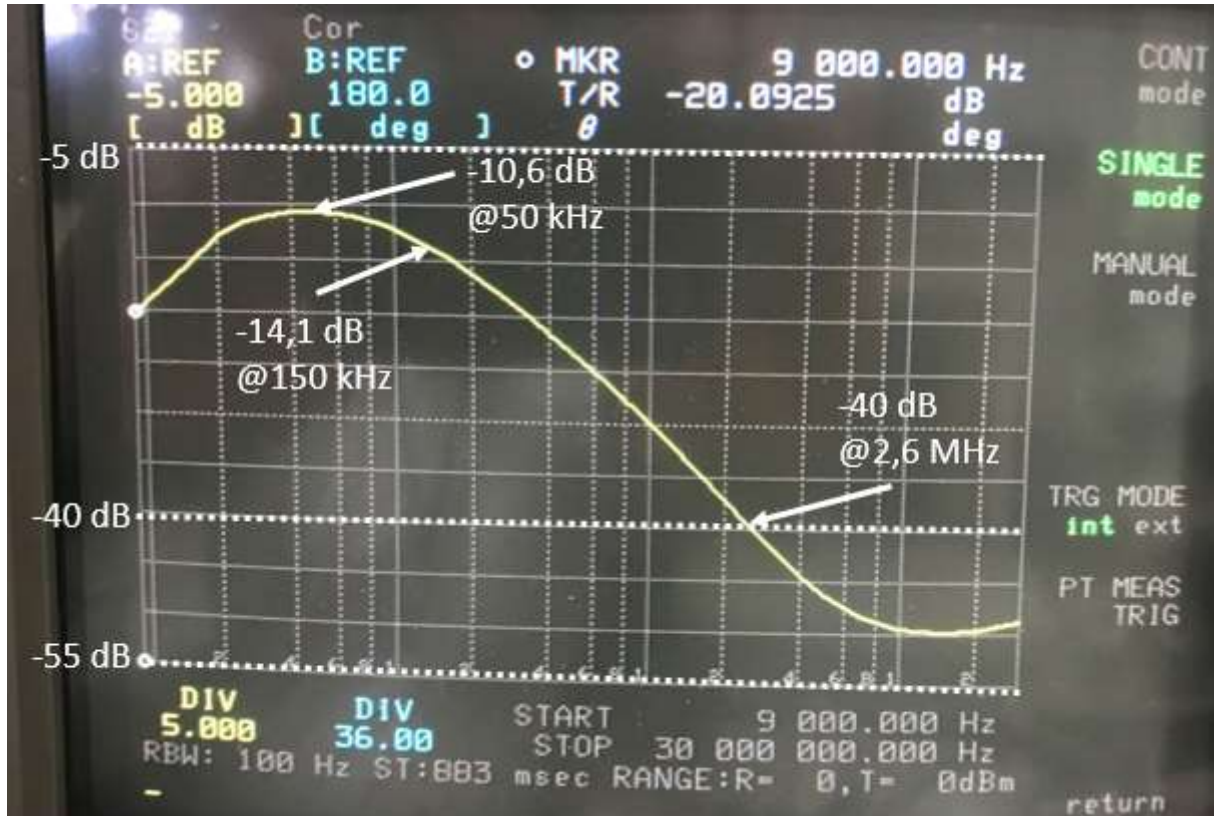
Tabela 10 - Caracterização de isolamento - N

Frequência (MHz)	Limite admissível ≥ (dB)	Valor medido (dB)	Conclusão
0,009	40,00	20,09	Não conforme
0,015	40,00	15,70	Não conforme
0,020	40,00	12,98	Não conforme
0,025	40,00	11,80	Não conforme
0,030	40,00	11,17	Não conforme
0,040	40,00	10,66	Não conforme
0,050	40,00	10,61	Não conforme
0,060	40,00	10,78	Não conforme
0,070	40,00	11,04	Não conforme
0,080	40,00	11,38	Não conforme
0,090	40,00	11,74	Não conforme
0,100	40,00	12,13	Não conforme
0,150	40,00	14,13	Não conforme
0,170	40,00	14,90	Não conforme
0,200	40,00	15,97	Não conforme
0,250	40,00	17,59	Não conforme
0,300	40,00	18,99	Não conforme
0,350	40,00	20,22	Não conforme
0,400	40,00	21,32	Não conforme
0,500	40,00	23,23	Não conforme
0,600	40,00	24,84	Não conforme
0,700	40,00	26,24	Não conforme
0,800	40,00	27,51	Não conforme
0,900	40,00	28,64	Não conforme
1,000	40,00	29,67	Não conforme
1,200	40,00	31,52	Não conforme
2,000	40,00	37,08	Não conforme
2,500	40,00	39,47	Não conforme
3,000	40,00	41,43	OK
4,000	40,00	44,24	OK
5,000	40,00	46,16	OK
7,000	40,00	48,20	OK
10,000	40,00	49,42	OK
15,000	40,00	49,85	OK
20,000	40,00	49,67	OK
30,000	40,00	48,76	OK

Fonte: Autor

A curva de isolamento medida da linha N é apresentada na figura 35.

Figura 35 - Gráfico da medição de isolamento - N



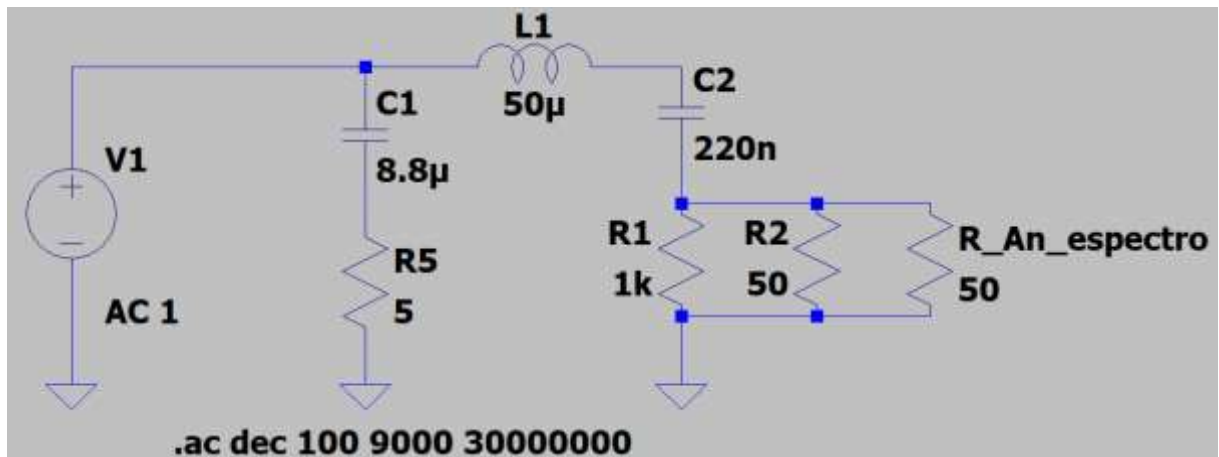
Fonte: Autor

Os resultados obtidos mostram que a isolamento da linha N da LISN apresentou resultados em conformidade com a tolerância apenas nas frequências acima de 2,6 MHz. Abaixo dessa frequência foram observados valores fora do limite admissível, com pior caso na frequência de 50 kHz, cuja isolamento medida foi de 10,6 dB.

Diante dos resultados, fica evidente a necessidade de melhorias no modelo do circuito adotado com respeito a filtragem dos sinais compreendidos entre 9 kHz e 2,6 MHz observados entre a porta de rede elétrica e a porta de RF.

Para abordar o problema identificado de forma isolada, foram conduzidas duas simulações do circuito da LISN usando o simulador LTspice. A primeira simulação representa o circuito da LISN que foi implementado, conforme mostrado na Figura 36.

Figura 36 - Diagrama elétrico do primeiro circuito simulado em LTspice



Fonte: Autor

A simulação foi realizada aplicando-se um sinal de varredura (Análise AC) no intervalo de 9 kHz até 30 MHz, com amplitude eficaz de 1 V e forma de onda senoidal. O resultado da resposta em frequência da isolamento da LISN é apresentado na Figura 37.

Figura 37 - Resultado da simulação em LTspice do primeiro circuito



Fonte: Autor

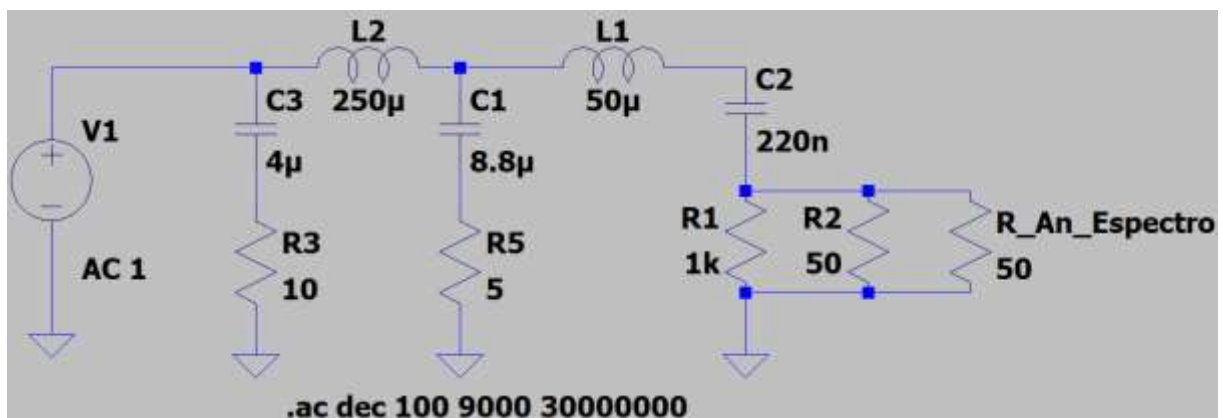
O sinal de entrada (porta de rede elétrica) é representado pelo traço azul (0 dB) enquanto o sinal de saída (porta de RF) é representado pelo traço verde. Para interpretar os resultados, é necessário adicionar uma atenuação de 10 dB ao sinal de saída. Essa atenuação adicional corresponde à perda causada pelo atenuador de 10 dB presente no circuito implementado, mas que não foi incluído na simulação.

Portanto, o ponto de interseção das linhas tracejadas brancas representa uma atenuação de 40 dB na frequência de 2,45 MHz.

Os resultados da simulação vão de encontro à isolamento medida no circuito implementado, que apresentou isolamento de 40 dB a partir de 2,6 MHz.

O segundo circuito simulado representa o circuito da LISN com a adição de um arranjo extra de filtro passa-baixa, composto por L2, C3 e R3, conforme mostrado na Figura 38.

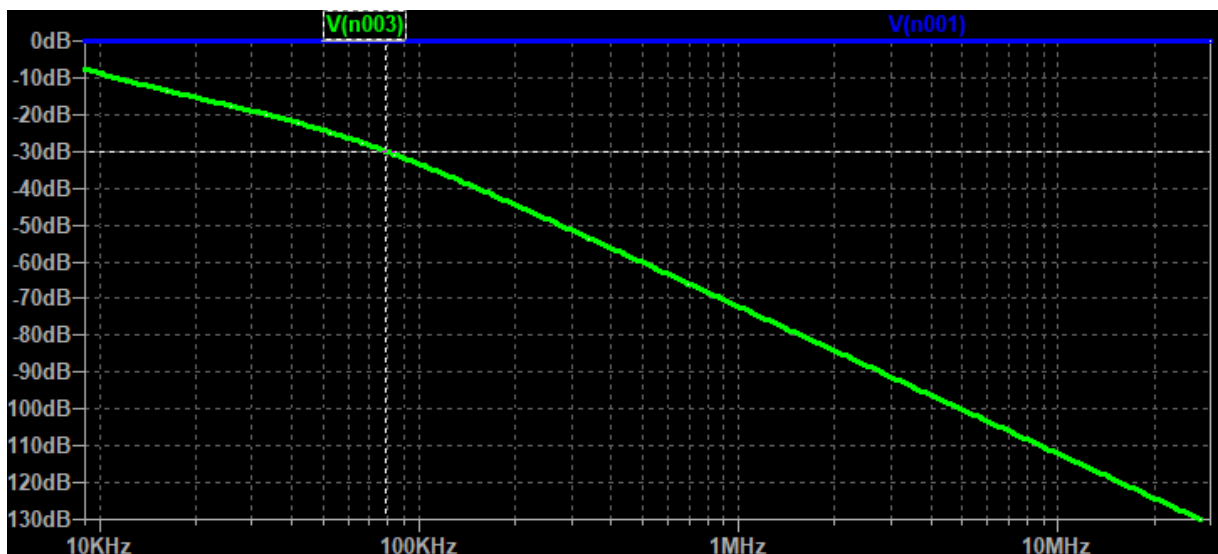
Figura 38 - Diagrama elétrico do segundo circuito simulado em LTspice



Fonte: Autor

A segunda simulação foi realizada nas mesmas condições de sinal aplicado da simulação anterior. O resultado da resposta em frequência da isolamento da LISN, agora incluindo o filtro passa-baixa adicional, está apresentado na Figura 39.

Figura 39 - Resultado da simulação em LTspice do segundo circuito



Fonte: Autor

Nesta simulação, observa-se que o ponto de isolamento de 40 dB, que, lembrando, consiste em uma atenuação de 30 dB do circuito e uma perda adicional de 10 dB devido ao atenuador (não incluído na simulação), ocorreu na frequência de 78,6 kHz.

Isso torna o circuito adequado para a realização de ensaios de medição de EMI conduzida, que geralmente ocorrem na faixa de 150 kHz a 30 MHz, sem a necessidade de alterações externas no arranjo ou o uso de uma fonte padrão adicional. A implementação dessa melhoria no circuito pode ser considerada para trabalhos futuros.

O circuito implementado foi mantido sem alterações para a conclusão deste trabalho, uma vez que apresentou resultados satisfatórios para as características de impedância e perda de inserção. Além disso, trata-se da implementação do circuito sugerido pela norma CISPR 16-1-2, com apenas algumas alterações de valores de componentes para valores comerciais.

De toda forma, para a realização dos ensaios de emissão conduzida, foram inseridos entre a porta de rede elétrica da LISN e o ponto da rede elétrica propriamente dito, um transformador isolador (relação 1:1) e um filtro de linha comercial. Essa alteração foi efetuada a fim de tentar filtrar externamente ruídos que pudessem estar presentes na rede elétrica e interferir nos resultados dos ensaios.

4.4 – Ensaio de emissão conduzida

A seguir, serão apresentados os resultados dos ensaios de emissão conduzida realizados nas cargas: multímetro de bancada, carregador de notebook e carregador de celular. Os resultados das linhas L1 e N serão reportadas separadamente e em sequência para cada caracterização realizada.

4.4.1 – Carga 1: multímetro de bancada

O primeiro ensaio realizado buscava medir o ruído eletromagnético emitido por um multímetro de bancada em funcionamento, na faixa de 150 kHz a 30 MHz.

Os resultados da linha L1 estão apresentados na Tabela 11.

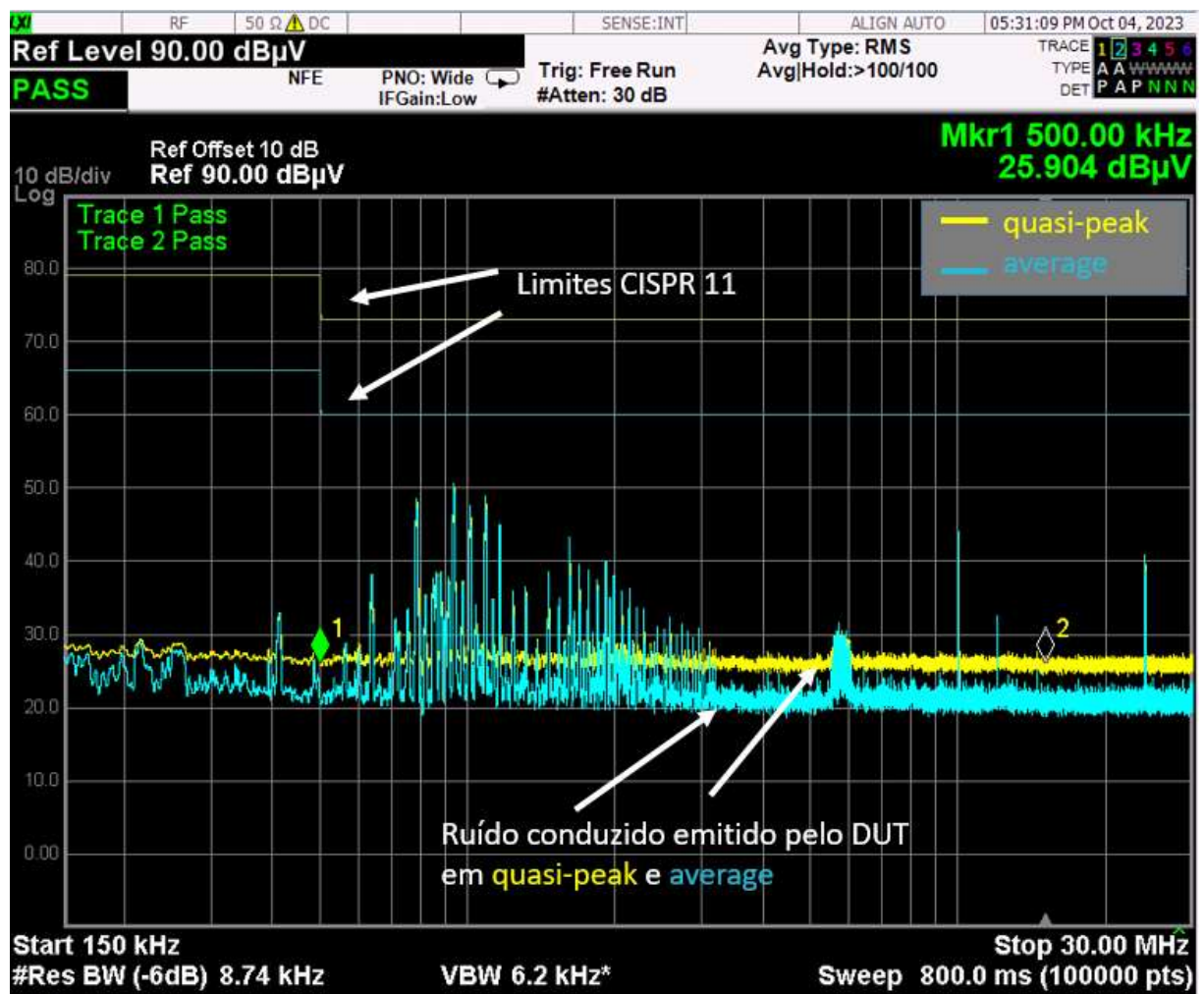
Tabela 11 - Ensaio de emissão conduzida do multímetro de bancada - L1

Frequência (MHz)	Detector: “quasi-peak”			Detector: “average”		
	Limite	Valor	Conclusão	Limite	Valor	Conclusão
	admissível ≤ (dBμV)	medido (dBμV)		admissível ≥ (dBμV)	medido (dBμV)	
0,150	79,00	28,95	OK	66,00	27,34	OK
0,170	79,00	27,70	OK	66,00	23,78	OK
0,200	79,00	28,05	OK	66,00	25,65	OK
0,250	79,00	28,16	OK	66,00	27,51	OK
0,300	79,00	27,20	OK	66,00	23,13	OK
0,350	79,00	27,45	OK	66,00	22,95	OK
0,400	79,00	26,93	OK	66,00	22,13	OK
0,500	73,00	25,97	OK	60,00	21,24	OK
0,600	73,00	28,36	OK	60,00	25,95	OK
0,700	73,00	26,20	OK	60,00	21,38	OK
0,800	73,00	26,84	OK	60,00	22,36	OK
0,900	73,00	31,81	OK	60,00	30,92	OK
1,000	73,00	28,91	OK	60,00	29,59	OK
1,200	73,00	26,23	OK	60,00	21,67	OK
2,000	73,00	25,89	OK	60,00	21,66	OK
2,500	73,00	25,62	OK	60,00	20,66	OK
3,000	73,00	25,81	OK	60,00	21,15	OK
4,000	73,00	26,50	OK	60,00	21,63	OK
5,000	73,00	25,78	OK	60,00	20,95	OK
7,000	73,00	26,22	OK	60,00	21,11	OK
10,000	73,00	44,07	OK	60,00	44,13	OK
15,000	73,00	25,93	OK	60,00	20,44	OK
20,000	73,00	26,83	OK	60,00	22,18	OK
30,000	73,00	26,94	OK	60,00	22,60	OK

Fonte: Autor

A curva emissão conduzida da linha L1 é apresentada na figura 40.

Figura 40 - Gráfico da emissão conduzida do multímetro de bancada - L1



Fonte: Autor

Para a linha L1, em toda a faixa de frequências de teste, os resultados obtidos para ambos os detectores (“quasi-peak” e “average”) estavam dentro dos limites estabelecidos pela norma CISPR 11. Além disso, a curva de resultados se assemelhou bastante ao piso de ruído da rede sem carga, ou seja, houve uma emissão de ruído pouco perceptível, dadas as condições de ensaio.

Os resultados da linha N estão apresentados na Tabela 12.

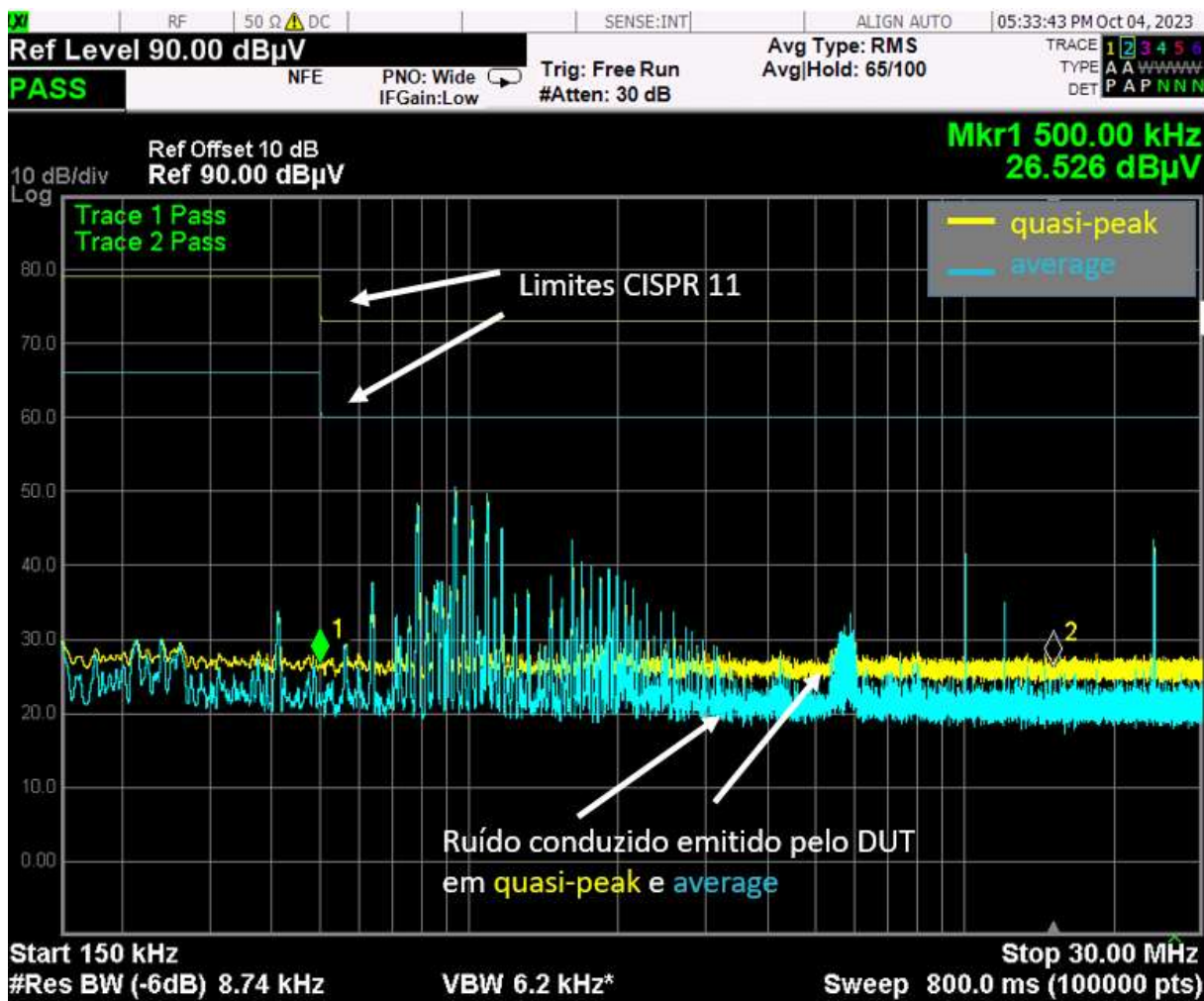
Tabela 12 - Ensaio de emissão conduzida do multímetro de bancada - N

Frequência (MHz)	Detector: “quasi-peak”			Detector: “average”		
	Limite	Valor	Conclusão	Limite	Valor	Conclusão
	admissível ≤ (dBμV)	medido (dBμV)		admissível ≥ (dBμV)	medido (dBμV)	
0,150	79,00	29,32	OK	66,00	28,07	OK
0,170	79,00	27,31	OK	66,00	23,22	OK
0,200	79,00	28,10	OK	66,00	27,06	OK
0,250	79,00	28,12	OK	66,00	26,66	OK
0,300	79,00	26,45	OK	66,00	22,46	OK
0,350	79,00	26,77	OK	66,00	22,60	OK
0,400	79,00	26,43	OK	66,00	21,38	OK
0,500	73,00	26,52	OK	60,00	21,59	OK
0,600	73,00	27,44	OK	60,00	23,48	OK
0,700	73,00	26,41	OK	60,00	21,14	OK
0,800	73,00	25,96	OK	60,00	21,07	OK
0,900	73,00	30,27	OK	60,00	29,46	OK
1,000	73,00	28,73	OK	60,00	28,64	OK
1,200	73,00	27,39	OK	60,00	23,11	OK
2,000	73,00	26,39	OK	60,00	21,54	OK
2,500	73,00	26,87	OK	60,00	23,12	OK
3,000	73,00	25,54	OK	60,00	19,81	OK
4,000	73,00	25,83	OK	60,00	20,59	OK
5,000	73,00	25,51	OK	60,00	20,80	OK
7,000	73,00	27,07	OK	60,00	22,75	OK
10,000	73,00	42,49	OK	60,00	42,64	OK
15,000	73,00	26,21	OK	60,00	21,18	OK
20,000	73,00	27,18	OK	60,00	22,66	OK
30,000	73,00	25,60	OK	60,00	20,47	OK

Fonte: Autor

A curva emissão conduzida da linha N é apresentada na figura 41.

Figura 41 - Gráfico da emissão conduzida do multímetro de bancada - N



Fonte: Autor

Para a linha N, em toda a faixa de frequências de teste, os resultados obtidos também estavam dentro dos limites estabelecidos pela norma CISPR 11 e a curva de resultados também se assemelhou ao piso de ruído da rede sem carga, ou seja, houve uma emissão de ruído pouco perceptível, dadas as condições de ensaio para as linhas L1 e N do multímetro de bancada.

4.4.2 – Carga 2: carregador de notebook

O segundo ensaio realizado buscava medir o ruído eletromagnético emitido por um carregador de notebook, com o notebook em carga, na faixa de 150 kHz a 30 MHz.

Os resultados da linha L1 estão apresentados na Tabela 13.

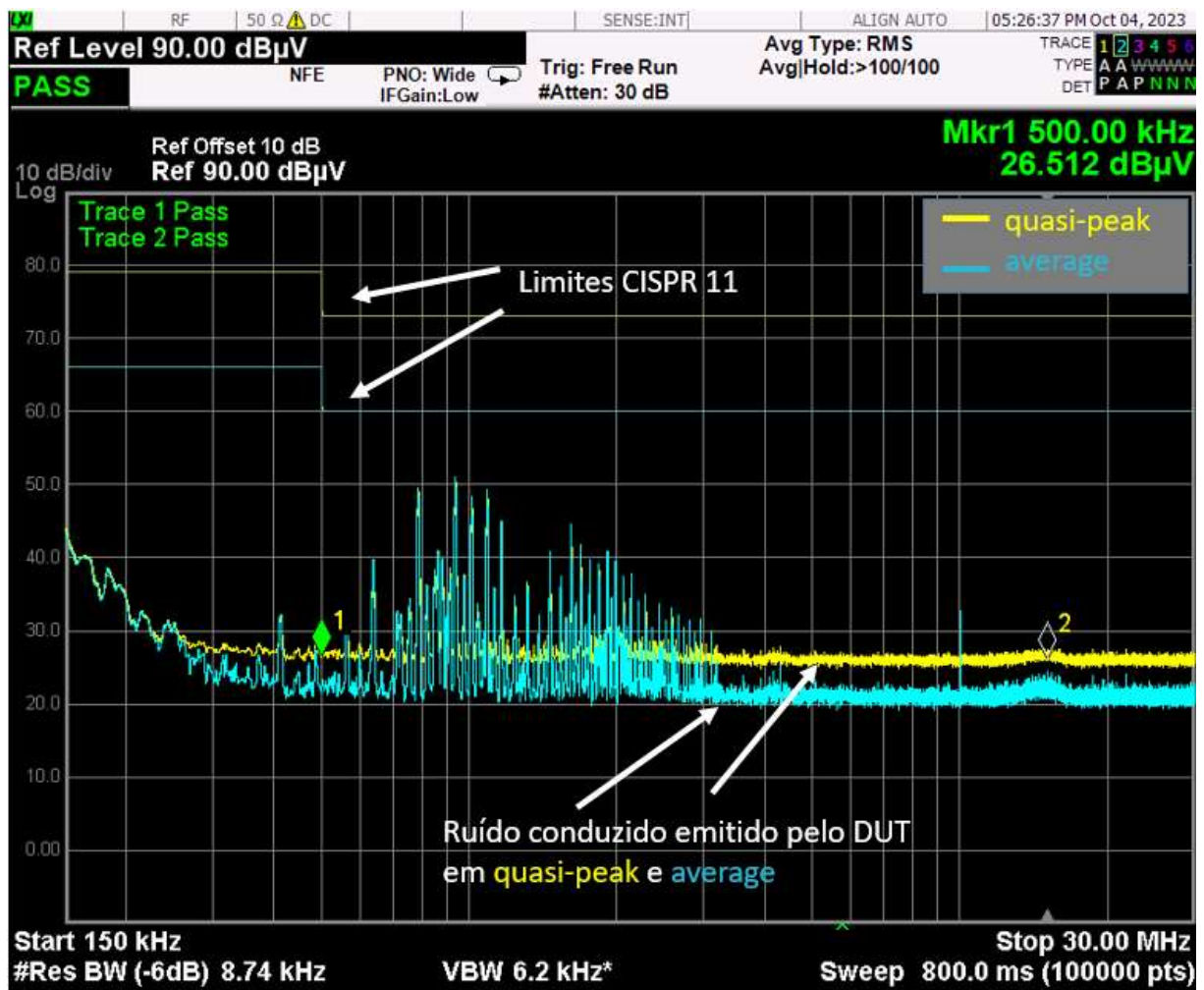
Tabela 13 - Ensaio de emissão conduzida do carregador de notebook - L1

Frequência (MHz)	Detector: “quasi-peak”			Detector: “average”		
	Limite	Valor	Conclusão	Limite	Valor	Conclusão
	admissível ≤ (dBμV)	medido (dBμV)		admissível ≥ (dBμV)	medido (dBμV)	
0,150	79,00	41,10	OK	66,00	39,70	OK
0,170	79,00	37,96	OK	66,00	38,08	OK
0,200	79,00	33,23	OK	66,00	31,60	OK
0,250	79,00	29,97	OK	66,00	29,10	OK
0,300	79,00	28,19	OK	66,00	26,96	OK
0,350	79,00	27,50	OK	66,00	22,02	OK
0,400	79,00	26,99	OK	66,00	22,77	OK
0,500	73,00	26,53	OK	60,00	21,74	OK
0,600	73,00	27,38	OK	60,00	23,30	OK
0,700	73,00	26,03	OK	60,00	21,14	OK
0,800	73,00	26,26	OK	60,00	20,85	OK
0,900	73,00	32,13	OK	60,00	31,29	OK
1,000	73,00	28,40	OK	60,00	28,02	OK
1,200	73,00	27,18	OK	60,00	23,36	OK
2,000	73,00	26,31	OK	60,00	21,79	OK
2,500	73,00	26,98	OK	60,00	22,85	OK
3,000	73,00	26,69	OK	60,00	21,83	OK
4,000	73,00	26,50	OK	60,00	22,02	OK
5,000	73,00	26,23	OK	60,00	20,41	OK
7,000	73,00	26,06	OK	60,00	20,80	OK
10,000	73,00	32,69	OK	60,00	32,98	OK
15,000	73,00	25,99	OK	60,00	20,72	OK
20,000	73,00	26,15	OK	60,00	21,18	OK
30,000	73,00	26,27	OK	60,00	21,25	OK

Fonte: Autor

A curva emissão conduzida da linha L1 é apresentada na figura 42.

Figura 42 - Gráfico da emissão conduzida do carregador de notebook - L1



Fonte: Autor

Para a linha L1, em toda a faixa de frequências de teste, os resultados obtidos para ambos os detectores (“quasi-peak” e “average”) estavam dentro dos limites estabelecidos pela norma CISPR 11. Diferentemente do multímetro de bancada, a curva de emissão de ruído conduzido apresentou resultados acima do piso de ruído nas frequências até 300 kHz.

Os resultados da linha N estão apresentados na Tabela 14.

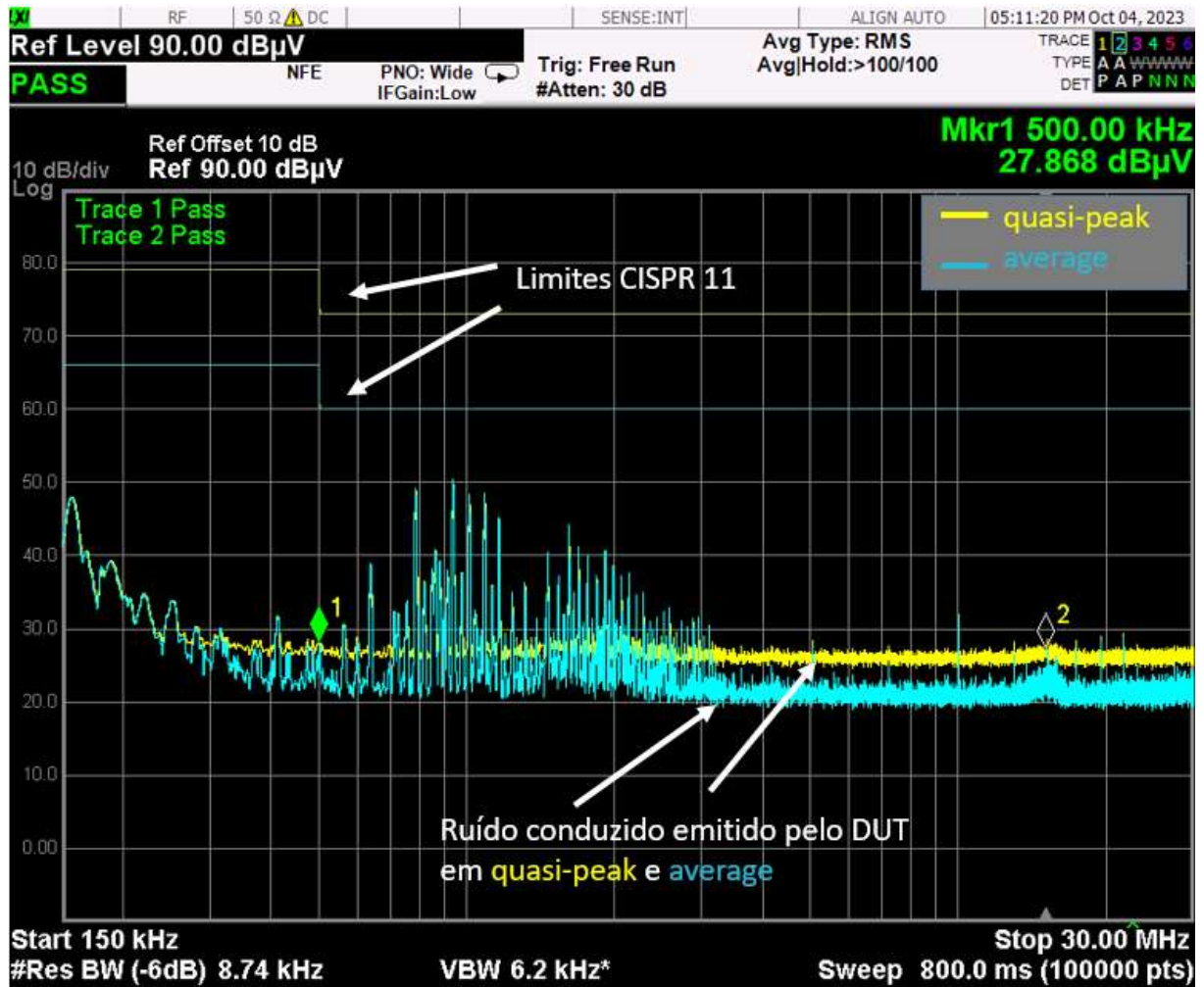
Tabela 14 - Ensaio de emissão conduzida do carregador de notebook - N

Frequência (MHz)	Detector: “quasi-peak”			Detector: “average”		
	Limite	Valor	Conclusão	Limite	Valor	Conclusão
	admissível ≤ (dBμV)	medido (dBμV)		admissível ≥ (dBμV)	medido (dBμV)	
0,150	79,00	39,83	OK	66,00	39,57	OK
0,170	79,00	40,25	OK	66,00	40,05	OK
0,200	79,00	34,74	OK	66,00	33,56	OK
0,250	79,00	32,58	OK	66,00	32,25	OK
0,300	79,00	27,92	OK	66,00	24,64	OK
0,350	79,00	28,03	OK	66,00	25,09	OK
0,400	79,00	27,68	OK	66,00	24,28	OK
0,500	73,00	28,31	OK	60,00	27,03	OK
0,600	73,00	27,55	OK	60,00	22,98	OK
0,700	73,00	26,54	OK	60,00	21,70	OK
0,800	73,00	26,34	OK	60,00	21,48	OK
0,900	73,00	31,41	OK	60,00	30,73	OK
1,000	73,00	28,60	OK	60,00	29,22	OK
1,200	73,00	27,24	OK	60,00	22,62	OK
2,000	73,00	26,27	OK	60,00	20,89	OK
2,500	73,00	27,71	OK	60,00	24,31	OK
3,000	73,00	26,21	OK	60,00	21,92	OK
4,000	73,00	26,82	OK	60,00	22,01	OK
5,000	73,00	26,01	OK	60,00	21,23	OK
7,000	73,00	25,76	OK	60,00	20,76	OK
10,000	73,00	32,30	OK	60,00	31,99	OK
15,000	73,00	26,78	OK	60,00	22,09	OK
20,000	73,00	26,45	OK	60,00	21,53	OK
30,000	73,00	26,82	OK	60,00	22,75	OK

Fonte: Autor

A curva emissão conduzida da linha N é apresentada na figura 43.

Figura 43 - Gráfico da emissão conduzida do carregador de notebook - N



Fonte: Autor

Para a linha N, em toda a faixa de frequências de teste, os resultados obtidos estavam dentro dos limites estabelecidos pela norma CISPR 11. De modo semelhante à linha L1, a curva de emissão de ruído conduzido apresentou resultados acima do piso de ruído nas frequências até 300 kHz e que diferencia os resultados obtidos com os do multímetro de bancada e levanta um primeiro indício de diferenciação de comportamento entre essas cargas, com relação à emissão conduzida.

4.4.3 – Carga 3: carregador de celular

O terceiro e último ensaio realizado buscava medir o ruído eletromagnético emitido por um carregador de celular, com o celular em carga, na faixa de 150 kHz a 30 MHz.

Os resultados da linha L1 estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Ensaio de emissão conduzida do carregador de celular - L1

Frequência (MHz)	Detector: “quasi-peak”			Detector: “average”		
	Limite	Valor	Conclusão	Limite	Valor	Conclusão
	admissível ≤ (dBμV)	medido (dBμV)		admissível ≥ (dBμV)	medido (dBμV)	
0,150	79,00	80,12	Não conforme	66,00	79,65	Não conforme
0,170	79,00	67,98	OK	66,00	68,48	Não conforme
0,200	79,00	69,25	OK	66,00	70,06	Não conforme
0,250	79,00	61,59	OK	66,00	61,86	OK
0,300	79,00	65,66	OK	66,00	65,32	OK
0,350	79,00	64,12	OK	66,00	63,90	OK
0,400	79,00	62,36	OK	66,00	62,09	OK
0,500	73,00	62,23	OK	60,00	62,87	Não conforme
0,600	73,00	60,05	OK	60,00	60,16	Não conforme
0,700	73,00	57,74	OK	60,00	56,96	OK
0,800	73,00	57,47	OK	60,00	57,33	OK
0,900	73,00	55,97	OK	60,00	56,06	OK
1,000	73,00	58,67	OK	60,00	58,85	OK
1,200	73,00	53,45	OK	60,00	52,93	OK
2,000	73,00	47,43	OK	60,00	48,35	OK
2,500	73,00	45,06	OK	60,00	44,37	OK
3,000	73,00	46,47	OK	60,00	46,50	OK
4,000	73,00	42,95	OK	60,00	42,25	OK
5,000	73,00	39,42	OK	60,00	38,95	OK
7,000	73,00	35,97	OK	60,00	35,90	OK
10,000	73,00	37,44	OK	60,00	37,33	OK
15,000	73,00	30,54	OK	60,00	30,37	OK
20,000	73,00	34,63	OK	60,00	33,94	OK
30,000	73,00	30,43	OK	60,00	29,94	OK

Fonte: Autor

Os resultados da linha N estão apresentados na Tabela 16.

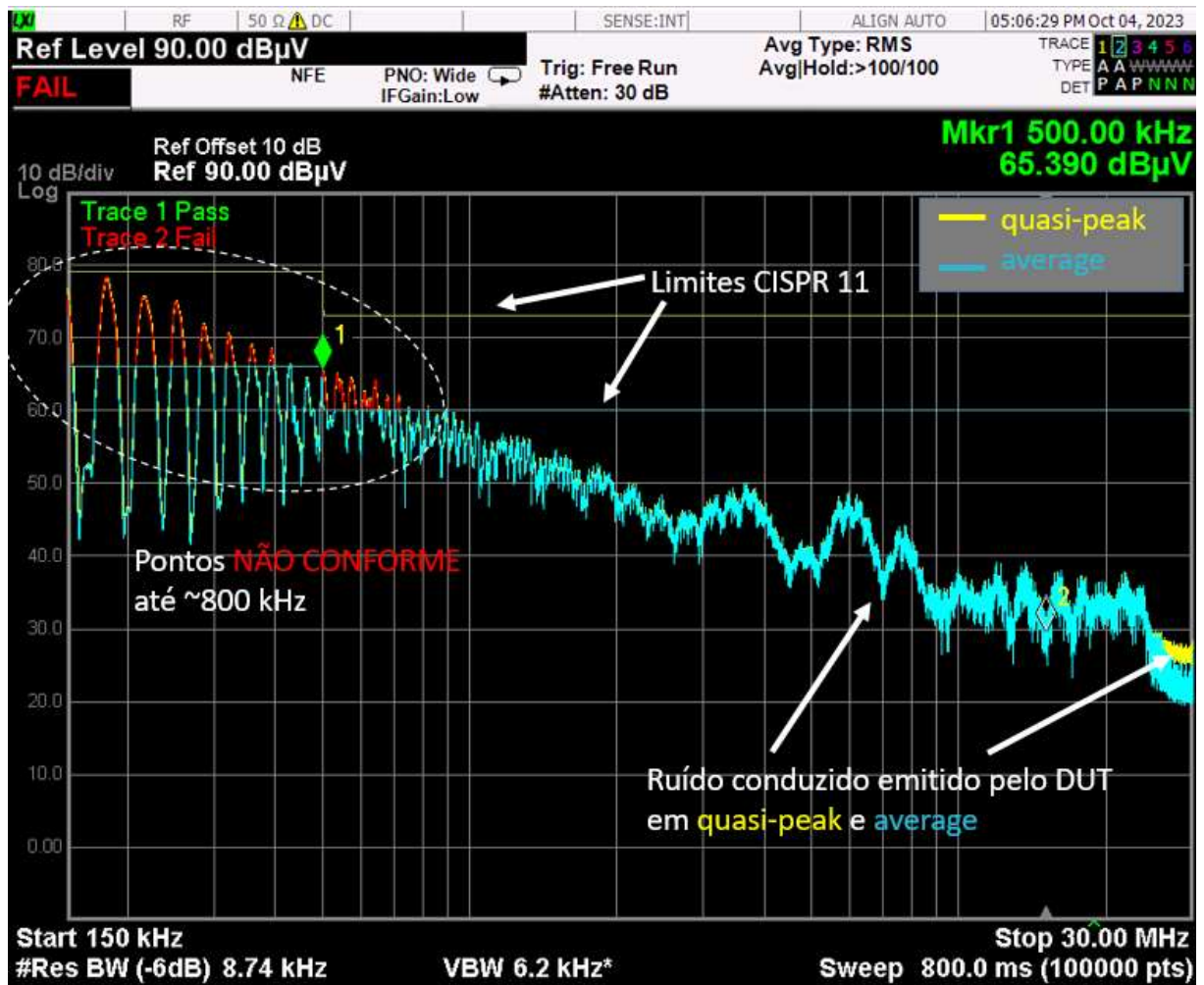
Tabela 16 - Ensaio de emissão conduzida do carregador de celular - N

Frequência (MHz)	Detector: “quasi-peak”			Detector: “average”		
	Limite	Valor	Conclusão	Limite	Valor	Conclusão
	admissível ≤ (dBμV)	medido (dBμV)		admissível ≥ (dBμV)	medido (dBμV)	
0,150	79,00	74,85	OK	66,00	74,47	Não conforme
0,170	79,00	65,76	OK	66,00	65,95	OK
0,200	79,00	49,63	OK	66,00	49,13	OK
0,250	79,00	74,38	OK	66,00	73,78	Não conforme
0,300	79,00	60,49	OK	66,00	58,21	OK
0,350	79,00	65,93	OK	66,00	66,15	Não conforme
0,400	79,00	63,28	OK	66,00	62,76	OK
0,500	73,00	64,23	OK	60,00	64,66	Não conforme
0,600	73,00	57,36	OK	60,00	57,09	OK
0,700	73,00	53,95	OK	60,00	53,44	OK
0,800	73,00	55,36	OK	60,00	56,82	OK
0,900	73,00	55,15	OK	60,00	54,21	OK
1,000	73,00	55,14	OK	60,00	56,07	OK
1,200	73,00	53,44	OK	60,00	54,43	OK
2,000	73,00	48,88	OK	60,00	48,22	OK
2,500	73,00	45,28	OK	60,00	44,74	OK
3,000	73,00	44,72	OK	60,00	43,75	OK
4,000	73,00	44,37	OK	60,00	43,61	OK
5,000	73,00	40,02	OK	60,00	39,69	OK
7,000	73,00	38,27	OK	60,00	37,66	OK
10,000	73,00	37,86	OK	60,00	37,45	OK
15,000	73,00	29,96	OK	60,00	30,34	OK
20,000	73,00	33,90	OK	60,00	33,80	OK
30,000	73,00	25,88	OK	60,00	21,29	OK

Fonte: Autor

A curva emissão conduzida da linha N é apresentada na figura 45.

Figura 45 - Gráfico da emissão conduzida do carregador de celular - N



Fonte: Autor

Para a linha N, na faixa de frequências entre 150 kHz e 800 kHz, os resultados obtidos para o detector “average” apresentaram vários pontos fora dos limites estabelecidos pela norma CISPR 11. Acima de 850 kHz para o detector “average” e em toda a faixa de testes para o detector de “quasi-peak”, os resultados estavam em conformidade com os limites estabelecidos, mas para o último detector haviam pontos próximos ao limite estabelecido.

Diferentemente das cargas anteriores, a curva de emissão de ruído conduzido mostrou resultados consistentemente acima do piso de ruído em toda a faixa de frequências de teste.

De maneira geral, os resultados para o carregador de celular explicitam uma diferença do perfil de carga, quando comparados aos ensaios do multímetro e do carregador de notebook.

Essa carga tem uma característica diferente das demais por se tratar de uma carga não homologada. Isso significa que caso tivesse passado por um processo de homologação, nos estágios de pré-certificação do produto, o carregador, da forma como está construído seria reprovado no quesito de emissão conduzida. Então o projeto do dispositivo deveria ser aprimorado até que os resultados dessa característica (e as demais) ficassem dentro dos limites estabelecidos pelas normas e pudesse avançar para a etapa de certificação do produto.

Os resultados distintos entre as cargas serviram para ilustrar a aplicabilidade da LISN desenvolvida. Embora tenha apresentado resultados insatisfatórios na característica de isolamento durante a caracterização, medidas foram adotadas, incluindo o uso de filtros e isoladores externos, para mitigar o ruído proveniente da rede elétrica. Os resultados de impedância e perda de inserção atingiram os resultados esperados. E pela diferenciação entre os perfis das cargas ensaiadas, mostrou também uma sensibilidade satisfatória dos sinais de emissão conduzida produzidos por elas.

4.4.4 – YouTube: demonstração dos ensaios realizados

Foi adicionado ao YouTube um vídeo contendo uma breve descrição de funcionamento da LISN desenvolvida, assim como foi realizada uma demonstração dos ensaios de emissão conduzida realizados neste trabalho.

O vídeo está disponível em: <https://youtu.be/5rTw5FjDI8Y>

4.5 – Estimativa de custos

Para o desenvolvimento da LISN foram utilizados diversos componentes eletrônicos discretos. São componentes facilmente encontrados no mercado nacional, como resistores, capacitores, indutores, chaves, cabo de energia, plugue de tomada, PCIilhada e caixa plástica organizadora e que totalizaram um gasto de R\$ 130,00.

Dispositivos como o atenuador de 10 dB, cabos de RF e o conector tipo SMA-N foram disponibilizados ao autor sem custo, pois se tratam de peças sobressalentes

pertencentes ao LME-IPT. Estes itens já não são facilmente encontrados no mercado nacional. Foram levantados os custos destes dispositivos no site <https://www.newark.com/pt-BR> :

- 1x RF Attenuator, 2 W /10 dB, N Plug-Jack, 50 Ω , marca L-COM, modelo LCAT1003-10 (modelo com as mesmas especificações do atenuador utilizado no projeto – HP 8491A).
1x R\$ 307,89 (US\$ 61,62) = R\$ 307,89
- 2x CABLE ASSY, N-TYPE JACK-SMA PLUG, 100MM ROHS COMPLIANT: YES, marca TAOGLAS, modelo CAB.955.
2x R\$ 86,74 (US\$ 17,36) = R\$ 173,48
- 1x RF / Coaxial Adapter, N, Plug, SMA, Jack, Straight Adapter, 50 ohm, marca MULTICOMP PRO, modelo MP-19-34-2.
1x R\$ 65,85 (US\$ 13,18) = R\$ 65,85
- Total parcial= R\$ 547,22 a serem adquiridos em distribuidor internacional por meio de importação.

Então, para a montagem da LISN, estima-se um custo aproximado de R\$ 680,00 em componentes eletrônicos.

Para a calibração das duas linhas da LISN em impedância e perda de inserção, realizada por laboratório acreditado RBC, estima-se um custo de R\$ 3.800,00, conforme cotação realizada com o LME-IPT. Dessa forma, sem considerar o custo de mão de obra da montagem do circuito, nem os impostos de importação dos dispositivos de RF, estima-se um valor de R\$ 4.500,00 para a montagem do circuito e a calibração da LISN em laboratório acreditado.

Para efeito de comparação, uma LISN comercial da marca Rohde & Schwarz, modelo ENV 216, que possui o mesmo modelo elétrico (" $50 \Omega // (50 \mu\text{H} + 5 \Omega)$ ") da LISN desenvolvida neste trabalho, é vendida no site [Batronix](https://www.batronix.com) por R\$ 16.015,37 (€ 3.040,00). Somado ao custo de calibração da LISN e sem considerar os impostos de importação, o custo pode chegar à ordem de R\$ 20.000,00.

A LISN desenvolvida neste trabalho possui uma especificação de corrente máxima admissível na carga de 2 A, enquanto a LISN comercial ENV 216 possui um

limite de 16 A. Dependendo da aplicação, a montagem de uma LISN em vez de adquirir o modelo comercial pode ser vantajosa e viável. Além disso, o modelo desenvolvido é passível de melhorias de especificações, como, por exemplo, o aumento da corrente máxima na carga, dependendo do indutor a ser utilizado.

4.6 – Especificações da LISN desenvolvida

A LISN desenvolvida possui as seguintes especificações:

- Tensão de alimentação: bivolt (127 V / 220 V) – 60 Hz
- Faixa de operação: 9 kHz a 30 MHz
- Impedância: $((50 \mu\text{H} + 5 \Omega) // 50 \Omega) \pm 20 \%$
- Perda de inserção $10 \text{ dB} \pm 0,5 \text{ dB}$
- Corrente máxima: 2 A
- Conforme CISPR 16-1-2

Com objetivo de facilitar o entendimento do usuário final a respeito das características da LISN, as suas especificações foram fixadas no corpo do dispositivo, conforme Figura 46.

Figura 46 - Especificações fixadas no corpo da LISN



Fonte: Autor

5 – Conclusões e perspectivas

Os principais objetivos deste trabalho incluem a implementação de uma LISN em conformidade com a norma CIRPR 16-1-2, sua caracterização e a realização de ensaios de emissão conduzida em cargas com diferentes perfis. Para alcançar esses objetivos, foram abordados diversos pontos, que abrangem desde os conhecimentos da literatura até a aplicação de testes de conformidade nas cargas.

Inicialmente, realizou-se uma revisão bibliográfica abordando o papel da LISN no contexto da compatibilidade eletromagnética, explorando conceitos, propósitos e seu modelo elétrico.

Foram apresentados conceitos e os problemas de compatibilidade eletromagnética, assim como os ensaios de medição de interferência radiada e conduzida.

Após o estudo teórico, foi realizada a implementação do circuito. Nessa etapa foi abordada a importância da escolha do indutor de 50 μ H. Em seguida foram testados todos os componentes do circuito e foi realizada a implementação da LISN.

Com base na norma CISPR 16-1-2, a LISN foi caracterizada. As linhas L1 e N passaram por medições de impedância, perda de inserção e isolação. As duas primeiras características apresentaram resultados satisfatórios, enquanto a isolação da LISN permaneceu abaixo de 40 dB até 2,6 MHz. Foram realizadas simulações do funcionamento do circuito, onde se verificou que para que ocorra a isolação de 40 dB entre o sinal de entrada e a porta de RF nas frequências de ensaio típicas, seria necessário modificar o circuito para incluir uma etapa adicional de filtragem do sinal de entrada.

Para testar o funcionamento da LISN, foram realizados ensaios de emissão conduzida em três cargas distintas. A primeira carga, um multímetro de precisão, apresentou nível de emissão semelhante ao piso de ruído da rede elétrica sem carga, ou seja, uma emissão pouco perceptível e em conformidade com os limites estabelecidos pela norma CISPR 11.

A segunda carga, um carregador de notebook, também apresentou resultados em conformidade com os limites, mas o nível de emissão para frequências até 300 kHz se mostrou até 20 dB maior que o nível de emissão do multímetro.

E a última carga, um carregador de celular, além de apresentar nível de emissão acima dos apresentados pelas duas primeiras cargas, obteve resultados fora

dos limites admissíveis. O carregador em questão não é um dispositivo homologado pela Anatel e os resultados obtidos sinalizam para a importância do uso de equipamentos certificados.

Apesar dos ensaios não terem sido realizados num ambiente eletromagnético ideal, os resultados indicam que a LISN desenvolvida foi capaz de proporcionar medições nas três cargas com sensibilidade suficiente para distinguir seus perfis de emissão conduzida quando submetidas ao mesmo ambiente eletromagnético.

Para a montagem do dispositivo foi estimado um custo de R\$ 680,00 com material e R\$ 3800 para calibração em um laboratório acreditado. Para efeito de comparação, uma LISN comercial, com maior capacidade de carga, é vendida no mercado internacional por cerca de R\$ 16000,00.

Os resultados obtidos demonstram o potencial de utilização do dispositivo desenvolvido e bom custo/benefício de implementação.

Como trabalhos futuros, sugere-se o aprimoramento do circuito, com a inserção de mais uma etapa de filtragem entre a porta de rede elétrica e o indutor de 50 μ H. Além disso, para aumentar a capacidade de carga, o indutor de 50 μ H pode ser desenvolvido conforme sugere a norma CISPR 16-1-2 no anexo A.7.1. Por fim, se disponível, uma LISN comercial poderia ser usada para comparar os resultados de caracterização e ensaios de EMC com a LISN desenvolvida, nas mesmas condições de teste.

REFERÊNCIAS

ALVARES, Manoel Guidi. **Desenvolvimento de Metodologia de Ensaios de Compatibilidade Eletromagnética para acessórios de Rede de uma Softstarter**. 2017. 99 p. TCC (graduação) - Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/197611/PFC%20Manoel%20Guidi%20Alvares_2017-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 08 abr. 2023

IEC. **IEC - 60050: International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 161: Electromagnetic Compatibility**. Genebra: IEC, 2023. Disponível em: <<https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=161-01-06>> . Acesso em 08 abr. 2023

IEC. **IEC CISPR 11: Industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment – Electromagnetic disturbance characteristics – Limits and methods of measurement**. 2.0 ed. Genebra: IEC, 2015, 90 p.

IEC. **IEC CISPR 16-1-1: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-1: radio disturbance and immunity measuring apparatus**. 5.0 ed. Genebra: IEC, 2019, 95 p.

IEC. **IEC CISPR 16-1-2: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-2: radio disturbance and immunity measuring apparatus – Coupling devices for conducted disturbance measurements** 6.0 ed. Genebra: IEC, 2014, 212 p.

INPE LIT. **Ensaios de Compatibilidade Eletromagnética**. São José dos Campos, SP: INPE, [2010] Disponível em: <https://www.lit.inpe.br/pt-br/ensaios_compatibilidade_eletromagnetica>. Acesso em: 12 abr. 2023.

IWASHITA, Juliana. **Compatibilidade eletromagnética em lâmpadas de Led**. 2015. Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br/compatibilidade-eletromagnetica-em-lampadas-de-led/>>. Acesso em: 08 fev. 2023.

LIZ, Muriel Bittencourt de. **Introdução à Compatibilidade Eletromagnética em Conversores Estáticos**. 1999. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/81098/143022.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> . Acesso em: 07 fev. 2023

MAYERHOFER, Michael. **Line Impedance Stabilization Networks: Basics and Overview**. V1.1. Tekbox Digital Solutions, 2022. Disponível em: <https://www.tekbox.com/product/LISN_Basics_and_Overview.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2023

ORFORD, Geoff; WILLIAMS, Tim. **Calibration and use of artificial mains networks and absorbing clamps: Proper use of transducers for CISPR-based emissions**

measurements. Schaffner Chase EMC, National Physical Laboratory, 1999. Disponível em:

<https://www.emcstandards.co.uk/files/calibration_and_use_of_amns_lisns_and_absorbing_clamps_tim_williams.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2023

PAUL, Clayton R. **Introduction to Electromagnetic Compatibility**. 2nd ed. Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience, 2006.

SALCEDO, Walter; LOBO, Marcio. **PSI 3212 - Laboratório de Circuitos Elétricos: Experiência 6 - Resposta em Frequência de Circuitos RC e RLC**. São Paulo, SP. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2018. Apresentação em Power Point. 9 slides. color. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4523135/mod_resource/content/7/Exp7%20_Introducao_Teorica_Resposta_Frequ%C3%Aancia_2019_SEMESTRAL_V3.pdf. Acesso em: 21 jul. 2023.

SCHLICHTING, Luís Carlos Martinhago. **Contribuição ao estudo da compatibilidade eletromagnética aplicada aos conversores estáticos**. 2003. 139 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/85109/194127.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 08 mar. 2023.

STROOBANDT, Serge Y. **RF Inductance Calculator for Single-Layer Helical Round-Wire Coils**. 2019. Disponível em: <https://hamwaves.com/inductance>. Acesso em 03 ago. 2023.

STRUZAK, Ryszard. **Co-existence: introduction to electromagnetic compatibility**. Trieste, Italy. ICTP-ITU/BDT-URSI. 7 fev. 2005. Apresentação em Power Point. 73 slides. color. Disponível em: <http://wireless.ictp.it/school_2005/lectures/struzak/Introd_to_EMC.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2023.

TRINTINALIA, Luiz Cezar. **Introdução à compatibilidade eletromagnética**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2021. Apostila. 211p. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7497572/mod_resource/content/10/Apostila2021.pdf. Acesso em: 10 out. 2023.

WILLIAMS, Tim. **EMC for product designers**. Fifth ed. Amsterdam ; Boston: Newnes, an imprint of Elsevier, 2017.

WRECKED EXOTICS. **Car got pinned between two trams and a pole. The lady who was driving got away without a scratch..** [S.l.]. Wrecked Exotics, c2008. Disponível em: <http://www.wreckedexotics.com/newphotos/bad/bad509.shtml>. Acesso em: 12 abr. 2023.

YAMASAKI, Diogo. **Técnicas Inovadoras para Análise de Interferência Eletromagnética**. São Paulo, SP. ABINEE. 28 jul. 2017. Apresentação de palestra em Power Point. 61 slides. color. Rohde & Schwarz do Brasil. Disponível em: <http://www.tec.abinee.org.br/2017/arquivos/i28.pdf>. Acesso em: 9 abr. 2023.